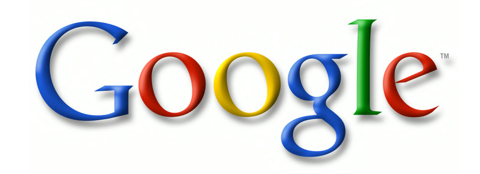




Die Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion Elektrischer Gleichstrom-Maschinen.

Praktisches Handbuch

für Elektrotechniker und Maschinenkonstrukteure

von

J. Fischer-Hinnen,

früh. Chefkonstrukteur der Maschinenfabrik Oerlikon.

Dritte, vollständig umgearbeitete und stark vermehrte Auflage.

Mit über 200 in den Text gedruckten Figuren und 3 lithogr. Tafeln.



Zürich

Verlag von Albert Raustein

vormals Meyer & Zellers Verlag

1897.

Buchdruckerei „Effingerhof" in Brugg.

Motto: Aus der Praxis, für die Praxis.

Vorwort zur dritten Auflage.

Die vorliegende 3. Auflage dieses Buches hat mit den früheren Auflagen wohl kaum mehr als den Titel gemeinsam. Wenn auch die Grundidee, welche mich bei der Abfassung desselben leitete, und welche durch das Motto hinreichend gekennzeichnet wird, die gleiche geblieben ist, so mögen demselben doch noch einige Bemerkungen als Wegleitung gegeben werden.

Die elektrische Litteratur ist überaus reichhaltig an Werken, welche die Berechnung von Gleichstrommaschinen zum Gegenstande haben, worunter einige, von Autoritäten wie Gisbert Kapp und Silvanus Thompson geschrieben, von unbestrittenem Werte sind. Wenn es der Verfasser dennoch unternimmt, neben diesen «technischen Klassikern» eine dritte Auflage seines *lediglich* der Praxis bestimmten Buches zu veranstalten, so hat dies lediglich seinen Grund in der überaus guten Aufnahme, welche die beiden früheren Auflagen gefunden haben, und deren Erfolg er einzig der Behandlungsweise des Stoffes zuschreiben zu dürfen glaubt.

Die grösste Schwierigkeit, welche sich dem angehenden Elektrotechniker entgegenstellt, besteht bekanntlich nicht in der Erlernung der für die Berechnung erforderlichen Lehrsätze und Formeln, sondern in der Art und Weise, das Erlernte praktisch zu verwenden, d. h. aus der Unmasse von Formeln gerade diejenigen herauszufinden, welche in einem gegebenen Falle schnell zum Ziele führen. Es muss ihm deshalb Gelegenheit gegeben werden, das Erlernte an Beispielen ausgeführter, mustergültiger Maschinen zu erproben. Dies ist um so unerlässlicher, als eben heutzutage, infolge der engen Verknüpfung der Elektricität mit den übrigen technischen Gebieten, vielfach von Technikern nach einem solchen Buche gegriffen wird, deren eigentlicher Beruf nicht die Elektricität ist, und die sich eine richtige Vorstellung und ein Urteil erst an Hand von Beispielen zu bilden vermögen.

Einen Hauptwert legte ich auf möglichst deutliche, der Praxis entnommene Zeichnungen. Äussere Ansichten oder Photographien sind für einen solchen Zweck wenig geeignet und sollen höchstens als Vervollständigung der Schnittzeichnungen benutzt werden.

Wer zu beobachten versteht, wird herausfinden, dass in dem konstruktiven Teile, abgesehen von unwesentlichen Nüancen, sozusagen

sämtliche modernen Konstruktionen aufgeführt sind, teils einzeln, teils in Verbindung mit andern Maschinenteilen. Wenn ich mich dagegen im VIII. Kapitel «Beschreibung ausgeführter Maschinen» speciell über schweizerische und wenige ausländische Fabrikate ausspreche, so bitte ich, mir dies nicht als Einseitigkeit anrechnen zu wollen. Dem Prinzipe getreu, nur Schnittzeichnungen aufzunehmen, musste ich überaus manches von der Hand weisen, was augenscheinlich mehr auf Reklame berechnet war und war daher auf das Material weniger Etablissements angewiesen, welche keine Vorurteile gegen eine solche Veröffentlichung hatten. Allerdings betrachte ich dieses Kapitel nicht als geschlossen, ich gestatte mir vielmehr, auch an die ausländischen und speciell deutschen Fabrikanten die ergebene Bitte um Überlassung von Schnittzeichnungen zu richten, die in einer späteren Auflage zur Verwendung kommen sollen.

Bei einem Werke dieser Art lag die Versuchung nahe, möglichst viele empirische Formeln einzuführen. Solche Formeln schaden dem Anfänger im allgemeinen mehr, als sie nützen. Ich habe deshalb nicht ermangelt, an den wenigen Stellen, wo mir solche zweckdienlich erschienen, jeweilig auch den Ursprung und die Ableitung anzugeben.

Durch Hinzufügung des Kap. VI (Bürstenverschiebung) glaube ich nunmehr nicht nur alle Elemente zu bieten, welche für die Berechnung von Gleichstrommaschinen benötigt werden, sondern, was nicht minder wichtig ist, zum ersten Male den Weg vorgezeichnet zu haben, wie eine Beurteilung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften solcher Maschinen möglich ist.

Zum Schlusse spreche ich allen denjenigen Firmen u. s. w., welche mich bei der Herausgabe dieser Auflage durch gefl. Beiträge unterstützt haben und insbesondere der Maschinenfabrik Oerlikon, der Elektricitäts-Gesellschaft Alioth, der Cie. de l'Industrie Electrique (Thury), der Usine Jos. Farcot in Paris, der Allmänna Svenska Elektr. Bologet (Wenstrom), den Herren Brown, Boveri & Cie., Herrn Prof. E. Arnold in Karlsruh und Herrn Ing. Dahlander in Vesterås meinen besten Dank aus.

Um den vielfach an mich ergangenen Anfragen zu entsprechen, teile noch an dieser Stelle mit, dass ich ein analoges Werk über Wechselstrom bereits in Arbeit habe, doch dürfte dasselbe nicht vor Mitte 1897 im Buchhandel erscheinen.

Le Raincy, S. et O. (près Paris),
den 3. Oktober 1896.

J. Fischer-Hinnen.

Inhaltsverzeichnis.

I. Allgemeine theoretische Ableitungen:

A. Entstehung von Elektromagneten: Seite

Begriff von Kraftlinien, Elektromagnetismus ... ... 1—3

B. Induktionserscheinungen:

1. *Generatoren:* Elektromotorische Kraft, Stromstärke, Widerstand, Ohm'sches Gesetz, Joule'sches Gesetz, Stromrichtungsregeln, Bürstenspannung 3–9
2. *Motoren:* Drehrichtung, Allgemeine Berechnung der Dimensionen ... ... 9—12

C. Masseinheiten, Widerstandsberechnungen:

Absolute und praktische Einheiten, Zugkraft, Berechnung des Widerstandes, Leitungsfähigkeit, Schaltungen, Beispiele 12—14

II. Berechnung der Armatur:

A. Wicklungsarten:

1. *Grammewicklungen* ... ... 16—20
2. *Trommelwicklungen* (Hefner-Alteneck, Arnold u. s. w.) 21—29
3. Vergleiche der Ring- und Trommelwicklungen ... 29—31
4. Bürstenverschiebung, Ursachen der Funkenbildung, Armaturreaktion, Wicklung Sayers 31–36

B. Armaturverluste:

1. *Ohm'scher Spannungs-Verlust,* Beispiele ... ... 37—39
2. *Hysteresis,* Formeln von Steinmetz, Beispiel .. ... 40—42
3. *Verlust durch Foucaultströme,* Formeln von J. A. Fleming, Beispiele ... ... 42—46
4. *Lagerreibung,* Beispiel ... ... 46—48
5. *Nutzeffekt, Erwärmung,* Formeln von W. B. Esson, A. H. und C. E. Timmermann, Vorschriften der englischen Admiralität ... ... 48—51

C. Umrechnung einer Armatur für andere Spannungen:

Allgemeine Formeln, Beispiel, spec. Leistung, Drahtisolation, Luftabstand ... ... 51—56

D. Vorausberechnung einer neu zu konstruierenden Armatur:

Seite

Allgemeine Formeln, Beispiele, Bestimmung des innern Armaturdurchmessers ... ... 57—64
Tabelle ausgeführter Armaturen verschiedener Systeme 65

III. Berechnung der Magnete:

A. Charakteristische Eigenschaften der verschiedenen Magnetschaltungen:

Einleitung, Charakteristik, Magnetisierungskurven ... 66—68
Die Seriemaschine, Prinzip der Kraftübertragung mittelst Seriemaschinen ... ... 68—73
Die Nebenschlussmaschine, Berechnung des Drahtquerschnittes, Beispiele, Schaltungen, Laden von Akkumulatoren ... ... 73—77
Regulierung von Nebenschlussmaschinen, Beispiel ... 77—79
Parallelschaltung von Nebenschlussmaschinen ... ... 79—81
Die Kompoundmaschine, Prinzipe, Beispiel ... ... 82—86
Parallelschaltung von Kompoundmaschinen, Anordnung von H. Dubs ... ... 86—87

B. Vergleiche über die drei Wicklungsarten bei Kraftübertragungsmaschinen:

Die Seriemaschine im allgemeinen, Verhalten bei verschiedenen Belastungen, Schaltungen ... ... 88—91
Tramwaymotoren, Änderung der Tourenzahl, Berechnung der Tourenzahl aus der Charakteristik, Beispiel ... 92—97
Regulierung der Geschwindigkeit:
a) *Mittelst Vorschaltwiderstand* ... ... 98—99
b) *Mittelst Umschalten der Magnete* (Sprague) ... 99—101
c) *Durch Parallelschalten von Widerstand zu den Magneten* ... ... 101—102
d) *Serie - Parallel - System,* Westinghouse, General Electr. Co. ... ... 102—106
Die Nebenschlussmaschine als Motor, Regulierung ... 107—109

C. Vergleichung der Drehrichtung bei Generatoren und Motoren:

Generatoren, Bestimmung der Drehrichtung ... ... 110—112
Motoren ... ... 113—115

D. Elektrische Bremsung; allgemeine Formeln, Beispiel ... 115—118

E. Umrechnung der Magnetwicklung bereits einmal ausgeführter Maschinen:

1. *Ausbohrung der Magnete unverändert,* Beispiele ... 118—127

Seite

2. *Ausbohrung der Magnetpole verschieden,* Beispiele, Änderung von Motoren ... ... 128—133

F. Vorausberechnung der Magnetwicklung:

1. *Einleitung,* Theorie von G. Kapp mit Beispiel ... 133—139
2. *Hopkinson'sche Theorie,*
   Allgemeine Formeln ... ... 139—147
   Bestimmung von δ und S für Zacken- und Locharmaturen ... ... 148—150
   Bestimmung des Streuungsverlustes, Formeln von Prof. Dr. Forbes, Beispiel ... ... 150—155
   Beispiele über die Hopkinson'sche Methode ... ... 155—157

IV. Experimentelle Bestimmung der Permeabilität:

Bestimmung mittelst ballistischem Galvanometer ... 158—160
Methode des Verfassers ... ... 160—164

V. Lösung einiger praktischer Fragen über Gleichstrommaschinen auf graphischem Wege:

A. Konstruktion der Charakteristik mit Beispiel ... ... 165—170

B. Bestimmung des Spannungsabfalles von Nebenschlussmaschinen ... ... 170—172

C. Bestimmung einer Kompoundwicklung 172

D. Bestimmung von Nebenschlussregulatoren:

a) Für verschiedene Belastung, Beispiel ... ... 173—175
b) Für verschiedene Tourenzahl, Beispiel ... ... 175—179
c) Für Belastungs-Tourenschwankungen, Beispiel ... 179—182
d) Änderung der Bürstenspannung ... ... 182—183

E. Elektrische Kraftübertragung mittelst zweier Seriemaschinen (Siehe Seite 69—73) 183

VI. Bürstenverschiebung und Funkenbildung; Einleitung 184—186

A. Ableitung der Grundformeln ... ... 186—188

B. Bestimmung von $\frac{r}{L} \cdot t$ ... ... 189—191

C. Bürstenverschiebung, Formeln, Beispiele, Kontaktwiderstand 191—196

D. Funkenbildung ... ... 196—197

E. Korrektur der Bürstenverschiebung bei Motoren, Beispiele 197—201

F. Quermagnetisierung und Spannungsabfall, Magnetanordnungen vom Verfasser, Prof. Ryan, Swineburn, Schlussfolgerungen ... ... Seite 201—207

VII. Konstruktive Details:

A. Die Armatur:

1. *Die Welle,* Theorie von Autenheimer, Beispiele, Magnetischer Zug, Keile, Tabelle ausgeführter Dynamowellen ... ... 208—215
2. *Die Lager,* Formeln, Konstruktionsregeln, Lager von J. Farcot, Fives-Lille, General Electric Co., Westinghouse Co., Crocker-Wheeler, Spurzapfen nach J. J. Reifer 215—221
3. *Riemenscheiben und Seilscheiben,* Dicke und Breite von Riemen, Durchmesser von Seilen, Tabelle ausgeführter Seilscheiben, Hanfseile Patent J. H. Beck, Tabelle ... 221—225
4. *Der Armaturkörper,* Isolation der Eisenscheiben, Blechkonstruktion, Armaturen der Elektricitäts-Aktiengesellschaft vormals Lahmeyer & Cie., General Electric Co., Westinghouse Co., Maschinenfabrik Oerlikon, Alioth, Parshall, Brown, Boveri & Cie., J. Farcot u. s. w. ... 225—237
5. *Commutator und Wicklung,* Commutator: Ausführungen von Schuckert, Siemens & Halske u. s. w., Konstruktionsprinzipien ... ... 237—241
   Wicklung: Grammewicklungen und Trommelwicklungen, Herstellung der Schablonen, Isolationen, Drahtverbindungen mit dem Commutator ... ... 241—247
6. *Bandagen und Hülfscollectoren,* Berechnung, Tabelle der Drahtbeanspruchungen, Beispiele, Bandagenschlösser 247—251
7. *Bürstenhalter und Bürsten,* Beschreibung verschiedener Ausführungen: Brown, Lundell, Westinghouse Co., Wood, Thury, Oerlikon, Alioth u. s. w., Bürstendruck ... 251—259

B. Die Magnete:

1. *Das Magnetgestell;* Vergleiche über gusseiserne und Stahlmagnete ... ... 259—260
2. *Magnetspulen:* Wicklungsraum, Ausführung der Spule, Ableitungen ... ... 260—262

C. Klemmen und Kabelschuhe, Tabelle ... ... 263—264

D. Riemenspannvorrichtungen ... ... 264—265

VIII. Beschreibung ausgeführter Maschinen:

Seite

Zwei Dynamos der Maschinenfabrik Oerlikon, J. Farcot, Brown, Boveri & Cie., Elektricitätsgesellschaft Alioth, Compagnie de l'Industrie Electrique (Thury), Allmänna Svenska Elektr. Bologet (Wenstrom), Couffinhal in St. Etienne ... ... 266—290

IX. Gewichtsberechnung und Calculation:

Zahl der Pole, Gewichte kompletter Armaturen, Armatursterne, Eisenscheiben, Riemenscheiben, Lager, Magnete, Verteilung der Gewichte nach den Materialien ... 291—301

X. Übersichtliche Zusammenstellung der zur Berechnung notwendigen Formeln:

Einleitung ... ... 302—303

A. Armatur:

1. *Erste approximative Vorausbestimmung* der äussern Dimensionen ... ... 303—304
2. *Zweite Annäherungsrechnung,* Drahtquerschnitt, Lamellenzahl, Sättigung in den Zacken 305
3. *Bestimmung des innern Armaturdurchmessers,* Tabellen, Kontrollrechnung ... ... 305—306
4. *Berechnung der Erwärmung* ... ... 306—307
5. *Dimensionen des Commutators,* Bürstenauflagfläche ... 307
6. *Bestimmung der Bürstenverschiebung* ... ... 307—308
7. *Wellendurchmesser,* Keile 308

B. Magnete:

Berechnungsgang, approximative Bestimmung des Wicklungsraumes, Drahtquerschnitt und Windungszahl, Erwärmung ... ... 309—311

Formular für die Berechnung von Dynamomaschinen (sep. Blatt).

XI. Tabellen ... ... 312—321

Allgemeine Bezeichnungen.

Der Verfasser hat es versuchen wollen, die allgemeine Bezeichnungsweise, wie sie vom Elektriker-Kongress in Chicago (1893) aufgestellt wurde, zu adoptieren, konnte jedoch diese Absicht nur zum geringsten Teile ausführen, weil einerseits die in Aussicht genommenen Bezeichnungen für den vorliegenden Fall nicht ausgereicht hätten und anderseits die Benutzung von fett gedruckten Buchstaben neben gewöhnlichen in der nämlichen Gleichung die Deutlichkeit entschieden beeinträchtigt. Er zieht es deshalb vor, die nachstehende, besser zu behaltende und auch allgemeiner bekannte Schreibweise beizubehalten und konsequent durchzuführen. Hiebei sind sämtliche Masse in Centimetern zu verstehen, wenn nichts besonderes bemerkt ist.

- aw Ampère-Windungen (siehe $\mathfrak{J}m$).
- B Kraftlinien pro $^{c}/_{m}{}^{2}$.
  - B_a in der Armatur,
  - B_m in den Magneten,
  - B_l in der Luft.
- b Polbogenlänge.
- $\mathfrak{b}$ Riemenscheibenbreite in $^{c}/_{m}$.
- C Capacität in Mikrofarad.
- D Äuss. Armaturdurchmesser.
- D' Durchmesser des Fusskreises der Armaturzacken.
- D_1 Innerer Armaturdurchmesser.
- d Drahtdurchm. in $^{m}/_{m}$, auch Wellendurchmesser in $^{c}/_{m}$.
- E, e Spannung in Volt.
- f Reibungskoeff. (0,05—0,1).
- G Gewicht in $^{k}/_{g}$.
- H Magnetomotor. Kraft $= \frac{4\pi}{10}\, aw$.
- J Strom in Ampère, spec. Armaturstrom.
- $\mathfrak{J}$ Strom in Ampère, spec. Magnetstrom
- $\mathfrak{J}m$ $= aw$, Ampère-Windungen, spec. aw per magnetischen Stromkreis.
- i Strom in Ampère, im spec. Stromintensität = Amp. pro $^{m}/_{m}{}^{2}$, in Kap. V mit Rücksicht auf die vorhandenen Clichés = Magnetstrom $\mathfrak{J}$.
- K Streuungskoeff. an d. Magnetpolen.
- k aw pro $^{c}/_{m}$ Armaturumfang.
- k_m max zuläss. aw pro Armaturumfang (siehe Gl. 18).
- L Kraftlinienlänge, in spec. Fällen Selbstinduktionskoeff. (Kap. VI).
- $\mathfrak{L}$ Länge einer Windung in $^{m}/$.
- l Armaturlänge.
- m Anzahl Windungen pro Magnet.
- N Anzahl Drähte auf der Armatur.
- N_1 Anzahl Armaturabteilungen.
- N_2 Anzahl Commutatorsegmente.

n Tourenzahl pro Minute.

P Kraft in $^{k}/_{g}$.

p Anzahl Polpaare.

p_1 halbe Zahl Bürstenstifte.

Q Elektricitätsmenge in Coulombes.

R, r Widerstand in Ohm (Ω).

$\mathfrak{R}$ magnetischer Widerstand.

S Querschnitt, auf Magnete angewandt gleich Summe der Querschnitte sämtl. Magnetstromkreise, welche Linien nach dem gleichen Pol hin senden.

s Drahtquerschnitt in $^{m}/_{m}{}^{2}$.

t Zeit in Sekunden (S. 211 in Stunden).

V Volumen in $^{c}/_{m}{}^{3}$.

v Geschwindigkeit in $^{m}/$ per Sek.

W Watt oder, wenn besonders angegeben, auch Kilowatt.

W_s spec. Leistung (Leistung in Kilowatt bei 1000 Touren).

w Wattverlust.

- w_a Ohmscher Armatur-Verlust.
- w_h Hysteresieverlust.
- w_r Reibungsverlust.
- w_m Verlust in den Magneten.

Z Zugkraft in $^{k}/_{g}$.

α Winkel oder Koeffic., bei Trammotoren Traktionskoeff. (10-15).

β Winkel od. Koeffic., spec. $= \frac{b \cdot 2p}{D\pi}$

γ Bogen, welchen die Bürsten am Commutatorumfang umfassen, in $^{c}/_{m}$, in Kap. V Verhältnis zweier Tourenzahlen, in Kap. VII Koefficient.

δ Einfacher Luftabstand der Pole vom Armatureisen.

ε Spannungsverlust (z.B. 0,02—0,06), in Bruchteilen der ganzen Spannung.

ζ Nutzeffekt (z.B. 0,8), $\zeta \times 100$ Nutzeffekt in %.

η Hysteresiskoeffic. von Steinmetz (0,002—0,004), in Kap. VI Koefficient $\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$.

λ $= \frac{l}{D}$, Verhältnis der Armaturlänge zum Durchmesser.

μ Permeabilität.

ν Hopkinson'scher Streuungskoeffic (z. B. 1,1—2).

ξ siehe Fig. 110.

ϱ Specif. Widerstandskoeffic., für Kupfer $= \frac{1}{60}$.

σ Widerstandszunahme pro C°.

τ $= \frac{D_1}{D'}$ = Innerer Armaturdurchmesser, geteilt durch den Durchmesser d. Fusskreises d. Zacken.

τ_1 $= \frac{D_1}{D}$ = Innerer Armaturdurchmesser, geteilt durch äusseren.

Φ Linienzahl, spec. Linien pro Pol.

Ω Widerstandseinheit in Ohm (Ω).

ω Perioden-(Cycle-)Zahl per Sekunde $= \frac{pn}{60}$.

I. Allgemeine theoretische Ableitungen.

A. Entstehung von Elektromagneten.

Jeder stromdurchflossene Leiter von beliebiger Gestalt erzeugt magnetische Kraftlinien, welche um den Leiter als Axe kreisen.

Ob man sich zwar eine wirkliche Bewegung der Kraftlinien vorstellen darf, bildet gegenwärtig noch eine Streitfrage und es scheint beinahe wahrscheinlicher, dass die Kraftlinien nach ihrem Entstehen einen ruhenden Zustand annehmen. Nichtsdestoweniger wollen wir jenen vielleicht etwas unpassenden Ausdruck des „Kreisens" beibehalten, weil sich dadurch manche Erklärungen auf weit einfachere Weise geben lassen.

In sehr starkem Masse äussert sich diese Erscheinung, wenn wir den Leiter bei einem magnetisierbaren Körper, z. B. einem Eisenstabe, vorbei oder um denselben herum führen (Fig. 1); dadurch wird der Eisenstab während der Dauer des Stromes zu einem Elektromagneten von genau den gleichen Eigenschaften wie ein gewöhnlicher Stahlmagnet.

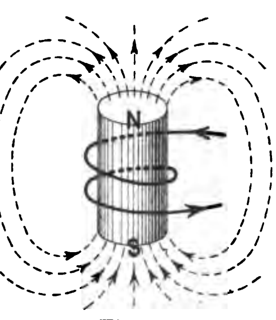


Fig. 1.

Schaut man nach der Richtung des Stromes im Leiter, so wird hiebei angenommen, es finde ein Kreisen der Kraftlinien um den Leiter im Sinne des Uhrzeigers statt, und man bezeichnet mit **Nordpol** dasjenige Ende des Eisenstabes, von welchem die Kraftlinien ausgehen. Das entgegengesetzte Ende heisst magnetischer **Südpol**.

Wird der stromdurchflossene Leiter um den Eisenstab herumgeführt, so mag für die Bestimmung der Pole auch noch eine weitere von Ampère angegebene Regel benützt werden:

Betrachtet man die Windung von einem der beiden Pole aus, und hat der durch dieselbe fliessende Strom die Richtung des Uhrzeigers, so ist der betreffende Pol ein Südpol; ist dagegen die Stromrichtung umgekehrt zu derjenigen des Uhrzeigers, so bildet das fragliche Stabende einen Nordpol.

Als Mass für die Stärke des Magnetismus gilt die durch die Flächeneinheit (cm^2) gehende Anzahl Kraftlinien (**Intensität** der Kraftlinien).

Anmerkung. Wenn man von einem Pole im allgemeinen spricht, versteht man darunter einen Punkt, von welchem alle Kraftlinien ausgehen. Da nun für die Einheit der Kraftliniendichte eine Kraftlinie pro Flächeneinheit kommt und die Oberfläche der um den Pol gebildeten Kugel mit dem Radius Eins gleich 4π ist, so gehen folglich vom Einheitspole 4π Kraftlinien aus.

Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die von einem Pole von der Stärke P austreten, wird also

$4\pi P$ sein.

Die magnetisierende oder elektromagnetische Kraft kann ferner noch dadurch erhöht werden, dass man auf den Eisenstab statt einer einzelnen Windung eine grössere Zahl fortlaufend gewickelter Windungen anbringt.

Bedeutet $\mathfrak{J}$ den Strom in Ampères, welcher durch die Spirale fliesst,
L die Länge der Spule in cm,
m die Anzahl Windungen,

so ist die magnetisierende Kraft

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{\mathfrak{J} m}{L},$$

die Feldintensität, d. h. die Anzahl Kraftlinien pro cm^2 im innern der Spule

$$B = \mu \, . \, H,$$

worin der Koefficient μ die „Permeabilität" oder magnetische Leitungsfähigkeit der von der Spule umfassten Materie bedeutet.

Enthält die Spule kein Eisen, so ist $\mu = 1$; für Eisen variiert dieselbe je nach dem Sättigungsgrade zwischen 200 bis 50, d. h. sie ist 50 bis 200 mal grösser als Luft.

Hat die Spule einen Querschnitt von S ㎠, so beträgt die totale Zahl der Kraftlinien

$$\Phi = \frac{4\pi}{10} \frac{S\mu}{L} \cdot \mathfrak{J} m, \text{ oder allgemein}$$

$$\Phi = \frac{\mathfrak{J} m}{\mathfrak{R}},$$ worin $\mathfrak{R}$ den magnetischen Widerstand darstellt.

Den Faktoren $\mathfrak{J} m$ bezeichnet man allgemein mit dem Ausdrucke Ampères-Windungen (aw).

Die magnetisierende Kraft bleibt die gleiche, wie immer auch die beiden Glieder $\mathfrak{J}$ und m gewählt werden, solange ihr Produkt $\mathfrak{J} m$ einen unveränderlichen Wert beibehält.

Magnetisches Feld heisst man die Umgebung eines Magneten; wird indessen bei Dynamomaschinen speciell für den Raum zwischen den beiden Polen angewandt.

Wird ein Magnet derart umgebogen, dass die Pole einander direkt gegenüber zu stehen kommen und ihre Flächen parallel sind, so kann angenommen werden, dass sich die Kraftlinien auf die Polfläche vollständig gleich verteilen; es entspricht dies dem Begriffe eines homogenen magnetischen Feldes (Fig. 3).

Anmerkung. Das Feld einer Dynamomaschine ist nur so lange homogen, als sich die stromlose Armatur im Felde befindet; ferner müssen die Pole konzentrisch zur Armatur ausgebohrt sein.

B. Induktionserscheinungen.

1. Generatoren.

Bringt man in eine Röhre aus leitendem Material einen Draht, dessen beide Enden mit einem Galvanometer verbunden werden und schickt man durch die Röhre einen Strom, so werden, wie oben nachgewiesen, Kraftlinien erzeugt, welche um die Röhre und den darin befindlichen Leiter kreisen. Wir machen aber dabei noch

eine weitere Beobachtung: Im Momente des Entstehens der Kraftlinien zeigt sich am Galvanometer ein Ausschlag, der davon herrührt, dass in dem Leiter ein Strom entstanden ist. Dieser Strom hat nur so lange Dauer, als durch Variation des Stromes in der Röhre eine Änderung von Kraftlinien stattfindet. Hält man den magnetischen Strom eine Weile konstant, so sinkt der Induktionsstrom auf Null herunter. Wird diese Änderung der Kraftlinien sehr rasch vollzogen, so fällt auch der Ausschlag um so stärker aus.

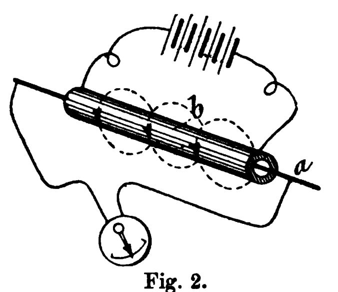


Fig. 2.

Es kann also dadurch, dass man um einen Draht Kraftlinien kreisen lässt, in demselben ein elektrischer Strom erzeugt werden. Dieser Strom wird allerdings nur dann auftreten, wenn der inducierte Draht in sich selbst geschlossen ist. Würde derselbe an irgend einer Stelle unterbrochen, so entsteht vorläufig an seinen beiden Enden eine elektromotorische Kraft *(EMK)* oder Spannung, welche einen Strom zu erzeugen sucht.

Das Gleiche tritt ein, wenn man einen Leiter derart durch ein magnetisches Feld bewegt, dass durch denselben Kraftlinien geschnitten werden.

Um zu einer möglichst einfachen Darstellung der Sachlage zu gelangen, wollen wir annehmen, es befinde sich in einem homogenen magnetischen Felde (Fig. 3) senkrecht zu den Kraftlinien ein einzelner elektrischer Leiter, z. B. ein Kupferdraht von der Länge l. Wir wollen nun denselben mit einer gewissen Geschwindigkeit v ℳ pro Sekunde senkrecht zu sich selbst und zur Richtung der Kraftlinien bewegen,

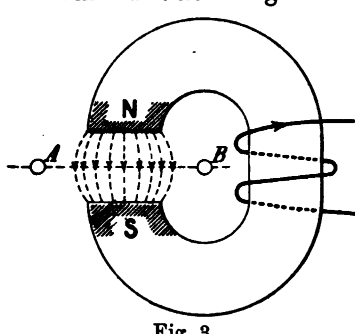


Fig. 3.

so entsteht sofort an seinen beiden Enden eine gewisse elektromotorische Kraft *(EMK)* e, welche um so grösser wird, je

länger der Kupferdraht ist, je grösser die magnetische Intensität B und je rascher die Bewegung vollbracht wird.

1. $$e = l \,.\, B \,.\, v.$$

Da aber $l \,.\, v$ nichts anderes ist als die durch den Draht beschriebene Fläche und B die Zahl der Kraftlinien pro Flächeneinheit bedeutet, so wird folglich auch die EMK nur durch die in der Zeiteinheit (Sekunde) geschnittene Anzahl Kraftlinien gemessen.

Mathematisch gesprochen ist folglich

$$e = \frac{d\Phi}{d\,t},$$

wenn Φ für die totale Zahl Linien steht.

Anmerkung. In Wirklichkeit sind die Vorgänge beim „Schneiden" von Kraftlinien genau die gleichen wie im vorigen Fall.

Bewegt sich der Draht (Fig. 3) nämlich von A bis B, so nimmt die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche um denselben kreisen, stetig zu, bis sie in B das Maximum erreicht. Es sei hiebei v der Weg, den der Draht in der Zeiteinheit zurücklegt. Da die Zunahme an Kraftlinien pro Zeiteinheit stets gleich $l \,.\, B \,.\, v$ ist, so wird also während der Bewegung von A bis B eine konstante EMK produziert. Würde man über B hinausgehen, so findet keine Änderung der Kraftlinien mehr statt, die EMK ist daher gleich Null.

Verbinden wir die beiden Enden des genannten Drahtes durch einen zweiten Leiter L, welcher sich jedoch nicht im Bereiche der inducierenden Wirkung der Kraftlinien befindet, so erhalten wir sofort einen elektrischen Strom, dessen **Stromstärke** J direkt proportional der Spannung E und umgekehrt proportional der Summe der **Widerstände** R beider Leiter ist.

2. $$J = \frac{E}{\Sigma R} \text{ (Ohm'sches Gesetz).}$$

Der elektrische Effekt dieses Vorganges ist

3. $$J \,.\, E = J^2 \,.\, R = \frac{E^2}{R} \text{ (Gesetz von Joule).}$$

Multiplizieren wir beide Seiten von Gleichung 1 mit J, so erhalten wir links einen Ausdruck für die in der Zeiteinheit geleistete

Arbeit, rechts ein Produkt aus einer Grösse v, welche den Weg darstellt, und $B\,l\,J$, welche als Zugkraft aufzufassen ist, die bei diesem Vorgang aufgewendet werden muss.

Die **Richtung** des inducierten Stromes hängt von der Richtung ab, in welcher die Kraftlinien geschnitten werden und kann leicht nach der Faraday'schen Regel bestimmt werden:

„Denkt man sich derart in das magnetische Feld gelegt, dass die Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten, und sieht man nach der Direktion der Bewegung, so ist der inducierte Strom stets nach rechts gerichtet."

Hiebei bezeichnet man als die positive Richtung der Kraftlinien, wie bereits angedeutet, jene, in welche sich der Nordpol einer in das magnetische Feld gebrachten Magnetnadel stellen würde, also die Richtung vom magnetischen Nordpole nach dem Südpole.

Hält man an der Definition fest, dass zur Erzeugung einer EMK ein Kreisen von Kraftlinien um den Leiter erforderlich sei, was auch im Grunde genommen der Thatsache besser entspricht, so lässt sich auch für diese Annahme eine Stromrichtungsregel aufstellen:

Betrachtet man die Spule in der Richtung der eintretenden Kraftlinien und findet bei der angenommenen Bewegung eine Abnahme der Gesamtzahl der Kraftlinien statt, so hat der Strom die Richtung des Uhrzeigers.

Statt der in Fig. 3 veranschaulichten Anordnung können wir auch voraussetzen, der bewegliche Leiter beschreibe um eine senkrecht zur Richtung der Kraftlinien stehende, in der Mitte des magnetischen Feldes befindliche Axe einen Cylindermantel, wie dies thatsächlich bei den gewöhnlichen Dynamomaschinen zutrifft. v_1 sei gleich der Umfangsgeschwindigkeit pro Sekunde, α gleich dem Winkel, den der bewegliche Leiter in irgend einer Lage zur neutralen Zone nn (siehe Fig. 4) einschliesst; im übrigen sollen

die früheren Bezeichnungen gelten. Die Armatur sei zunächst ohne Eisen vorausgesetzt.

Für die vorliegende Annahme wird sich natürlich die inducierte *EMK* in dem Leiterelemente stetig ändern, weil wir eben, je nach der respektiven Stellung desselben, mehr oder weniger Kraftlinien schneiden. Allgemein kann gesagt werden, es ist für irgend einen Punkt

$$e = l \,.\, B \,.\, v_1 \,.\, sin.\, \alpha,$$

oder, wenn wir mit n die Tourenzahl pro Minute, mit $\mathfrak{r}$ den Radius des beschriebenen Cylindermantels, resp. Armaturradius bezeichnen, so ist

Fig. 4.

$$e = l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \,.\, sin.\, \alpha.$$

Statt eines einzelnen Drahtes können wir uns zur Verstärkung des Effektes eine grössere Anzahl N derselben derart hintereinandergeschaltet denken, dass sich ihre *EMK* summieren. α, α_1, α_2 etc. seien die Winkel, welche die genannten Drähte mit der neutralen Zone einnehmen, so ist die Gesamtspannung

$$E = e + e_1 + e_2 + e_3 + \;.\;.\;.\;.\; e_n$$

$$= l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \,.\, sin.\, \alpha + l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \,.\, sin.\, \alpha_1 +$$

$$l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \,.\, sin.\, \alpha_2 + \ldots\ldots = l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \times \Sigma\, sin.\, \alpha.$$

Da aber $\Sigma\, sin.\, \alpha = N \frac{2}{\pi} \,.\, sin.\, 90^0 = N \,.\, \frac{2}{\pi}$ ist, so erhält die vorstehende Gleichung folgende Form:

4. $$E = N \,.\, l \,.\, B \,.\, \frac{2\,\mathfrak{r}\,\pi\, n}{60} \,.\, \frac{2}{\pi}.$$

Bei sämtlichen modernen Gleichstrommaschinen ist die Armaturwicklung zur Verminderung des Luftwiderstandes auf einer eisernen Trommel angebracht. Die Kraftlinien konzentrieren sich dadurch auf den Luftraum zwischen den Polen und dem Armatureisen, woselbst ein homogenes magnetisches Feld von bedeutender Intensität entsteht.

Um die allgemeine Spannungsformel abzuleiten, bedienen wir uns der Figur 5.

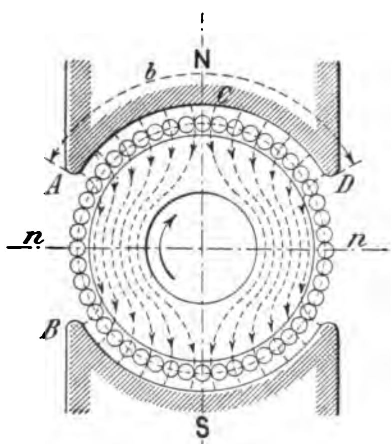


Fig. 5.

Die Trommel drehe sich in einem bestimmten Sinne mit der Geschwindigkeit

$$v = \frac{D \pi n}{60} \text{ cm.}$$

Wir gehen von dem Lehrsatze aus, dass die Spannung durch die Änderung der Kraftlinien pro Sekunde bestimmt sei.

In den sämtlichen Drähten zwischen A und B findet, wie ersichtlich, keine Änderung statt, es wird folglich in diesen Drähten auch keine Spannung erzeugt. Anders verhält sich die Sache bei den unter den Polen liegenden Drähten. Dieselben bewegen sich in der Sekunde um die Strecke v cm. Es gehen daher, je nachdem sich der Draht links oder rechts von C befindet, per Sekunde $v \,.\, B \,.\, l$ Kraftlinien weniger oder mehr um jeden einzelnen Leiter.

Bis C nimmt die Kraftlinienzahl ab, von da an zu; die Stromrichtung bleibt indessen unverändert, da sich die Richtung der Kraftlinien umgekehrt hat (vergl. Stromrichtungsregel Seite 6).

Die Spannung jedes einzelnen inducierten Leiters ist

$$e = v B l,$$

und da auf der ganzen Armatur

$$\frac{2 p \,.\, b}{D \pi} \,.\, N \text{ Drähte inducier werden,}$$

wobei p gleich der Zahl Polpaare ist, so ergibt sich hieraus eine gesamte Spannung

$$E = v \cdot B\,l \cdot \frac{2\,p\,b}{D\,\pi} \cdot N = \frac{2\,n \cdot B\,l \cdot b\,N}{60}\,p.$$

Um die Spannung in Volt zu erhalten, muss das Produkt noch durch 10^8 dividiert werden.

Diese Gleichung erleidet, auf gewöhnliche Gleichstrommaschinen angewendet, noch eine kleine Modifikation: Wir bezeichnen zunächst $B\,l\,b$, d. h. die Gesamtzahl der von einem Pole austretenden Linien mit Φ. Ferner liegt es, wie später gezeigt werden soll, in der Natur der Gleichstromwicklungen, dass stets so viele parallel geschaltete Stromkreise in der Armatur entstehen, als Bürstenstifte vorhanden sind. Bedeutet p_1 die Zahl der Stromzweige à 2 Ästen (gleichbedeutend mit der selben Zahl Bürstenstifte), so ist folglich die Spannung zwischen zwei Bürsten nur

$\frac{1}{2\,p_1}$ von der in obiger Formel angegebenen Spannung.

Wir gelangen daher zu der wichtigen Gleichung:

$$5. \qquad E = \frac{n\,\Phi \cdot N}{60 \cdot 10^8} \cdot \frac{p}{p_1} \text{ Volt.}$$

E heisst man die **interne** Spannung oder EMK; die **externe** oder **Bürstenspannung** ist gleich der internen weniger dem Voltverluste in der Armatur (siehe Kap. II B).

Diese Formel hat, wie schon die Ableitung zeigt, gleiche Gültigkeit für Ring- und Trommelarmaturen, insofern für N nicht die Anzahl Windungen, sondern Drähte am Umfang der Armatur eingesetzt werden.

2. Motoren.

Wir haben bisher von der Erzeugung elektrischer Induktionsströme gesprochen. Wir können nun aber auch umgekehrt annehmen, der genannte Leiter befinde sich in ruhendem Zustande innerhalb dem magnetischen Felde. Sowie wir nun seine beiden Enden mit einer Stromquelle von gegebener Spannung e verbinden,

so wird er sich sofort mit einer ganz bestimmten maximalen Geschwindigkeit v und Zugkraft Z senkrecht zur Richtung der Kraftlinien zu bewegen suchen, und zwar ist:

$$v = \frac{e}{l \cdot B}; \quad Z = i \cdot l \cdot B.$$

Wird e in Volt, i in Ampère gemessen, so ist für Centimetermasse

$$v = \frac{e \cdot 10^8}{l \cdot B}.$$

Die Bewegungsrichtung findet man nach der folgenden Regel:

Man denke sich derart in das magnetische Feld gelegt, dass die Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten, und sieht in der Richtung des durch den Leiter fliessenden Stromes; der ausgestreckte rechte Arm gibt dann die Richtung der Bewegung an.

Diese Erscheinung kann auf einfache Weise an Figur 6 erklärt werden.

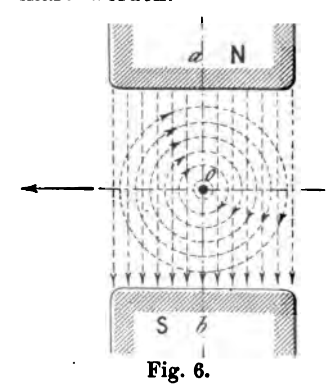


Fig. 6.

O sei der stromdurchflossene Leiter, der senkrecht zur Papierebene angenommen werden muss. Fliesst der Strom in demselben in der Richtung gegen das Papier hin, so erzeugt er Kraftlinien, welche um den Leiter im Sinne des Uhrzeigers kreisen. Es entsteht folglich eine Kraftlinienverdichtung rechts von $a\,b$ und eine Verminderung der Intensität links von $a\,b$, wodurch der Draht nach links verdrängt wird.

Die Formel 5 lässt sich auch auf elektrische Motoren zur Bestimmung der Tourenzahl anwenden:

$$n = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot \frac{p_1}{p}.$$

Das heisst: Je grösser die Bürstenspannung am Motor ist, um so grösser fällt auch seine Tourenzahl aus; umgekehrt lässt

sich die Tourenzahl durch Verstärkung des magnetischen Feldes erniedrigen. Beide Methoden werden zur Regulierung der Geschwindigkeit von Motoren benutzt.

* * *

Die Benutzung von Gleichung 5 für praktische Berechnungen liegt auf der Hand:

Man kann zunächst von einer bestimmten Luftsättigung B ausgehen, wobei man den Polbogen b als Bruchteil des vorläufig noch unbekannten Armaturumfanges in die Rechnung einsetzt.

$$b = \beta \frac{D\pi}{2p}.$$

Der Drahtdurchmesser d ist als abhängige von der bereits zum voraus bekannten Stromstärke J und der zulässigen Belastung i pro $^{m}/_{m}{}^{2}$ ebenfalls gegeben. Ferner bestimmt man für die angenommene Armaturkonstruktion (glatte, Loch- oder Zackenarmatur) die Zahl der Windungen, welche pro $^{c}/_{m}$ Armaturumfang placiert werden können, so dass

$$N = k_1 \,.\, D\pi \text{ ist,}$$

die Armaturlänge $l = \lambda D$ gesetzt.

Die Gleichung 5 kann also folgendermassen geschrieben werden:

$$E = \frac{n \,.\, B\beta \,.\, D\pi\lambda D \,.\, k_1 \,.\, D\pi}{2 \,.\, p \,.\, 60 \,.\, 10^8} \,.\, \frac{p}{p_1} = \frac{nB \,.\, \beta\lambda k_1 \,.\, \pi^2 \,.\, D^3}{2 \,.\, 60 \,.\, 10^8 \,.\, p_1}$$

woraus

$$D = \sqrt[3]{\frac{E \,.\, p_1 2 \,.\, 60 \,.\, 10^8}{nB \,.\, \beta\lambda \,.\, k_1 \,.\, \pi^2}}.$$

(Für den praktischen Gebrauch bequemere Formeln finden sich in den späteren Kapiteln, siehe Gleichungen 41—45 und 49.)

In dieser Gleichung sind E und n zum voraus bekannte Grössen, p_1, B, $\beta\lambda$ und k_1 Faktoren, welche nach Gutfinden gewählt werden können; die Berechnung von D ist also sehr einfach.

Sind die Dimensionen der Armatur einmal bekannt, so kann an die Berechnung der Magnete geschritten werden, die so auszuführen ist, dass pro Pol die vorausgesetzte Linienzahl Φ erreicht

wird. Die Berechnung von Gleichstrommaschinen zerfällt also in folgende zeitlich aufeinander folgende Operationen:

1. Bestimmung der Armatur mit Zugrundelegung einer bestimmten Φ.
2. Bestimmung der Magnete zur Erreichung dieser Induktion.

C. Masseinheiten, Widerstandsberechnungen.

Für diejenigen Leser, welche weniger vertraut mit den Grundgesetzen der Elektricitätslehre sind — eine allgemeine Kenntnis der wichtigsten Gesetze muss übrigens als selbstverständlich vorausgesetzt werden — mögen die speciell zum Verständnis dieses Buches erforderlichen Regeln noch einmal kurz resümiert werden:

Misst man Stromstärke und Spannung in sogenannten absoluten Einheiten (gr, cm, sek. Einheiten), so erhält man die Arbeit als Produkt der beiden in *Ergs*. Für praktische Berechnungen eignen sich jedoch diese absoluten Masse ihrer überaus kleinen Einheiten wegen nicht, man führte daher sogenannte praktische Einheiten ein:

Praktische Einheit der Stromstärke	1 Ampère (A.) =	10^{-1} absolute Einheiten
Praktische Einheit der Spannung	1 Volt (V.) =	10^{8} " "
Praktische Einheit des Widerstandes . . .	1 Ohm (Ω.) =	10^{9} " "
Praktische Einheit des elektrischen Effektes	1 Volt-Ampère oder Watt (V.A.) =	10^{7} " " (Ergs)
Praktische Einheit des mechanischen Effektes	1 Sek.Kg.Mtr. =	$9{,}81 . 10^{7}$ " "
	1 PS =	$736 . 10^{7}$ " "

Aus der vorstehenden Tabelle folgt:

$$1\ Watt = \frac{1}{736}\ PS \text{ oder } 736\ Watts = 1\ PS.$$

(Die englische Pferdestärke $HP = 746$ *Watts*.)

Unter der absoluten Einheit der Kraft, dem *Dyn*, wird jene Kraft verstanden, welche der Masse eines Grammes die Beschleunigung eines $\%_m$ in der Sekunde erteilt:

1 gr. ist daher gleich *981 Dyn*,

1 $^k/_g$ = *981000 Dyn*.

Unter Berücksichtigung, dass die praktische Einheit der Stromstärke 10 mal grösser als die absolute ist, erhalten wir somit die Zugkraft in $^k/_g$ ausgedrückt

6. $$Z = \frac{Bl \,.\, J}{9{,}81 \,.\, 10^6},$$

wenn J in Ampères gemessen wird.

Es soll beispielsweise die Zugkraft in einem einzelnen Drahte einer Armatur ausgerechnet werden, wenn derselbe sich in einem Magnetfelde von 6000 Linien pro $\%_m^2$ bewegt. Ferner sei der Strom, welcher durch den Draht fliesst, 100 Ampères und die Armaturlänge 50 $\%_m$.

Gleichung 6 ergibt hiefür:

$$\text{Zugkraft } Z = \frac{6000 \,.\, 50 \,.\, 100}{9{,}81 \,.\, 10^6} = 3{,}06 \ ^k/_g.$$

Wir sehen hieraus, dass, je dicker der Draht bezw. je grösser die Stromstärke in demselben ist, um so grösseres Gewicht auf eine gute Befestigung desselben gegen Verschiebung gelegt werden muss.

Der Widerstand eines Leiters wird nach der Formel berechnet:

7. $$R = \frac{\mathfrak{L}}{s} \,.\, \varrho.$$

$\mathfrak{L}$ Länge des Leiters,

s Querschnitt desselben, und

ϱ Widerstands-Koefficient $= \dfrac{1}{\text{specif. Leitungsfähigkeit}}$.

Die Tabelle I (am Schlusse des Buches) enthält die Widerstands-Koefficienten für verschiedene Leiter bei 0° Celsius. Der Widerstand nimmt mit der Erwärmung zu und zwar nicht im gleichen Grade bei den verschiedenen Materialien. Kohlen bilden hievon eine Ausnahme.

Aus dem Widerstands-Koefficienten bei 0° lässt sich derselbe bei t^0 ableiten:

$$8. \qquad \varrho^t = \varrho^0 (1 + \alpha t)$$

(siehe Tabelle I am Schlusse des Buches).

Die Widerstandszunahme bei Erwärmung ist manchmal ziemlich gross, so dass man gut thut, dieselbe, insbesondere bei Berechnung von Nebenschlusswicklungen, in Rechnung zu ziehen. Es mag an einem Beispiele gezeigt werden:

Nehmen wir an, die Magnetspule erwärme sich auf 60°, was häufig vorkommen mag, so ist

$$\varrho^t = \varrho^0 (1 + 60 \,.\, 0{,}0037) = 1{,}22\, \varrho^0,$$

d. h. der Widerstand der Magnetspule steigt um 22 %, oder, was gleichbedeutend ist, der Erregerstrom sinkt um den gleichen Betrag.

Bei der **Hintereinanderschaltung** einer Anzahl von Widerständen r_1, r_2, r_3 u. s. w. ist der totale Widerstand gleich der Summe der einzelnen Widerstände, d. h.:

$$9. \qquad R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots \text{ u. s. w.}$$

Bei der **Nebeneinander-** oder **Parallelschaltung** ist die totale Leitungsfähigkeit des Systems, d. h. der reziproke Wert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Leitungsfähigkeiten der einzelnen Zweige:

$$10. \qquad \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \ldots \text{ u. s. w.}$$

$$11. \qquad R = \frac{r_1 \,.\, r_2 \,.\, r_3 \,.\, r_4}{r_2 \,.\, r_3 \,.\, r_4 + r_1 \,.\, r_3 \,.\, r_4 + r_1 \,.\, r_2 \,.\, r_4 + r_1 \,.\, r_2 \,.\, r_3} \text{ etc.}$$

II. Berechnung der Armatur.

A. Wicklungsarten.

Wir haben gesehen, dass die Stromrichtung davon abhängt, ob eine Zunahme oder Abnahme der um den Draht kreisenden Kraftlinien stattfindet.

Ein solcher Übergang findet statt, sobald der Draht aus dem Bereiche eines Poles in den eines andern übertritt (neutrale Zone). Um daher einen gleichgerichteten Strom zu erhalten, muss der Strom an dieser Stelle commutiert werden.

Dies geschieht bei der ideellen Maschine (Fig. 7) dadurch, dass die Bürsten *A* und *B* im Momente der Stromumkehr die Commutatorsegmente wechseln.

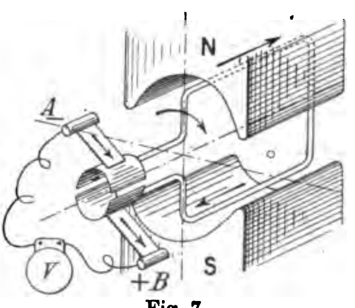


Fig. 7.

Anmerkung. Der Commutator von Gleichstrommaschinen wird auch häufig mit Collector bezeichnet. Wir folgen hier dem englischen Sprachgebrauche, der in dieser Beziehung strikter ist und die Bezeichnung Collector auf die sogenannten Schleifringe begrenzt.

Im Nachstehenden sollen nun, soweit dies der Platz erlaubt, eine Anzahl der am häufigsten vorkommenden Wicklungsarten besprochen werden.

Wer sich für noch weitere Wicklungsarten interessiert, dem sei hier das Specialwerk von Prof. E. Arnold über Ankerwicklungen empfohlen*).

*) Während der Indrucknahme dieses Buches erschien eine zweite Auflage des Buches von E. Arnold.

1. Gramme Wicklungen.

Figur 8 stellt einen sogen. Gramme-Pacinetti-Ring dar. Alle Drähte am Umfange der Armatur, welche oberhalb der neutralen Zone *nn* liegen, werden, wie ersichtlich, von einem gleichgerichteten Strome durchflossen; desgleichen die unterhalb der neutralen Zone liegenden Drähte, in letzteren ist jedoch die Stromrichtung umgekehrt. Würden auch Kraftlinien in den Luftraum im innern der Armatur dringen, so entstände dadurch in den daselbst befindlichen Drähten eine *EMK*, entgegengesetzt derjenigen in den äussern Drähten, die Gesamtwirkung würde also zum mindesten dadurch herabgedrückt. Da indessen der Luftraum den Kraftlinien einen bedeutend grössern Widerstand entgegensetzt als das Armatureisen, so kann die schädliche Wirkung beinahe vernachlässigt werden.

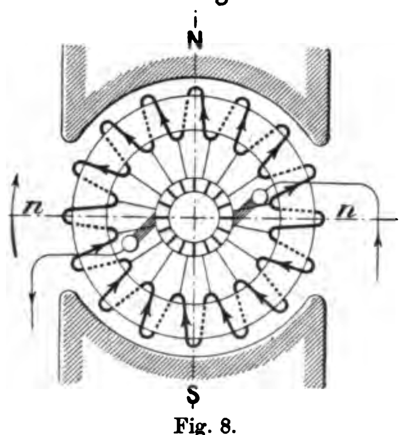


Fig. 8.

Um einen Vergleich der verschiedenen Wicklungsarten zu ermöglichen, soll in Nachstehendem mit

e die Spannung bezeichnet werden, welche in einem Leiterelement (Spule zwischen zwei Commutatorsegmenten) erzeugt wird. Wir machen hiebei der Einfachheit halber die Voraussetzung, dass sämtliche Spulen am Umfange der Armatur, also auch diejenigen ausserhalb den Polen, gleichmässig induciert werden, wodurch wir einen kleinen Fehler bei der Bestimmung von e_1 und e_2 machen;

e_1 gleich max. Spannungsdifferenz zwischen 2 Armaturspulen;

e_2 „ „ „ „ 2 Commutatorsegmenten;

N_1 gleich Anzahl Spulen, bei Grammeringen auch gleichzeitig die Anzahl Commutatorsegmente;

N_2 Anzahl Lamellen des Commutators;

p_1 Anzahl Stromverzweigungen à 2 Ästen, gleichbedeutend mit der Zahl Bürstenstifte; für eine zweipolige Maschine ist $p_1 = 1$, für eine vierpolige Maschine mit 2 Bürstenstiften $= 1$, mit 4 Bürstenstiften $= 2$ u. s. w.

Bei der Beurteilung von Wicklungen sind folgende Punkte von Bedeutung:

Maximale Spannung zwischen den nebeneinander liegenden Spulen oder Drähten;

Maximale Spannung zwischen 2 Commutatorsegmenten;

Maximal mögliche Zahl von Commutatorsegmenten;

Zahl der durch eine Bürste gleichzeitig kurz geschlossenen Drähte.

Für Fig. 8 ist

$$N_2 = N_1$$
$$e_1 = o$$
$$e_2 = \frac{2E}{N_2} = \frac{2E}{N_1}.$$

Zahl der gleichzeitig kurzgeschlossenen Armaturspule $= 1$.

Bei der mehrpoligen Ringarmatur (Fig. 9) sind soviele Stromäste als Pole vorhanden. Demzufolge ist

$$p_1 = p$$
$$N_2 = N_1$$
$$e_1 = o$$
$$e_2 = \frac{2p_1E}{N_1} = \frac{2p_1E}{N_1}.$$

Die auf einen Armaturdraht entfallende Stromstärke ist gleich dem Gesamtstrome dividiert durch $2p_1$.

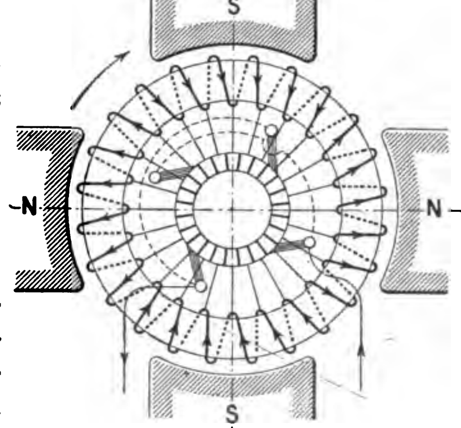


Fig. 9.

Wicklungen mit mehr als 2 Bürsten werden auch als Parallelwicklungen bezeichnet, im Gegensatze zu den Seriewicklungen.

Öfters ist es erwünscht, bei mehrpoligen Ringwicklungen die Zahl der Bürsten zu vermindern, was nach Mordey dadurch geschehen kann, dass man die einander gegenüberliegenden Commutatorsegmente miteinander verbindet (siehe Fig. 10).

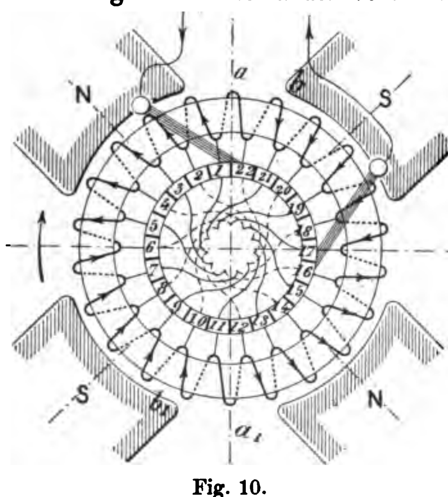


Fig. 10.

Selbstverständlich muss in einem solchen Falle der Commutator doppelte Breite erhalten. Bedingung ist auch, dass N_2 eine gerade Zahl sei.

Diese Anordnung kann auch auf Maschinen mit mehr als 2 Bürsten angewandt werden. Sie besitzt den Vorteil, dass kleine Spannungsdifferenzen der einzelnen Zweige ausgeglichen werden, ferner gestattet sie, die Bürsten eines Stiftes während dem Betriebe abzuheben.

Der Winkel zwischen 2 Bürsten ist stets

$$\alpha = \frac{360}{2\,p}$$

und die Bürsten kommen zwischen 2 Pole zu liegen.

Eine Untersuchung der Fig. 10 zeigt, dass auf diese Weise stets 2 Spulen a und a_1, b und b_1 parallel geschaltet sind.

Wir können also, ohne etwas an der Spannung der Maschine zu ändern, abwechslungsweise die eine dieser Spulen unterdrücken und dafür den Draht der übrigbleibenden doppelt so stark machen. Auf diese Weise gelangen wir zu der äusserst interessanten Wicklung Fig. 11, welche sich in hohem Grade für hochgespannte Maschinen eignet. Nach diesem Schema sind z. B. sämtliche Tramwaymotoren der Maschinenfabrik Oerlikon ausgeführt.

Eine besondere Eigentümlichkeit derselben besteht darin, dass

$$N_2 = 2\,N_1 \text{ wird.}$$

Um die Wicklung ausführen zu können, muss $\frac{N_2}{2} = N_1$ eine ungerade Zahl sein.

$$e_1 = \frac{2\,E}{N_1}$$

$$e_2 = \frac{2\,p\,E}{N_2} = e_1.$$

Das gleiche Schema lässt sich auch für 6polige Maschinen ausführen, doch werden hier die Verbindungen im Commutator etwas umständlich.

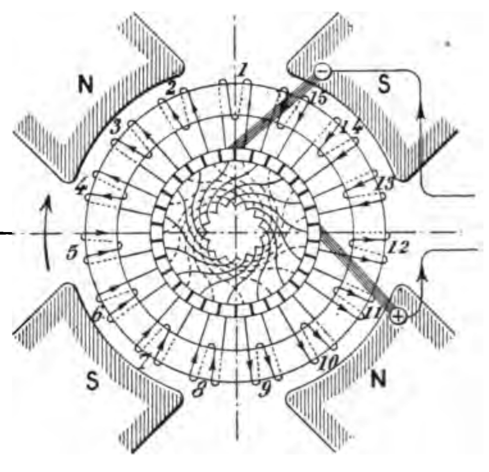


Fig. 11.

Fig. 12 stellt eine zweite **Serienringwicklung** für eine 4polige Maschine dar, die auch auf eine beliebige Polzahl anwendbar ist.

Der Wicklungsschritt y ist für eine beliebige Zahl von Pole

$$12. \quad y = \frac{N_1 \pm 1}{p}.$$

Für p gerade muss daher N_1 ungerade sein, für p_1 ungerade sind beide Fälle möglich.

$$N_2 = N_1$$

$$e_1 = \frac{2\,E}{N_1}\,(p+1)$$

$$e_2 = \frac{E}{N_2}\,.\,2p = \frac{E\,.\,2p}{N_1}$$

$$p_1 = 1$$

$$\alpha = \frac{360}{2\,p}.$$

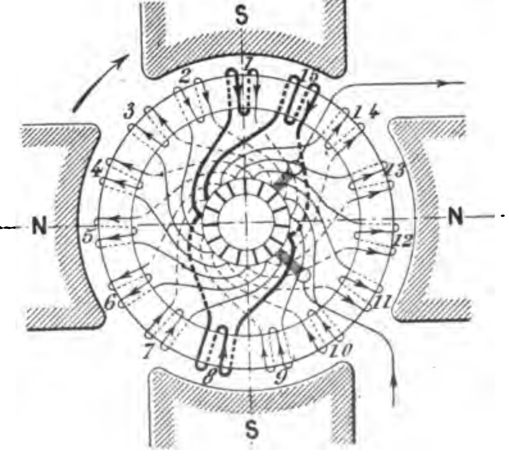


Fig. 12.

Die Bürsten kommen stets zwischen die Pole zu liegen.

Bei sehr grossen Maschinen mit Parallelwicklung ist es beinahe unmöglich, zu vermeiden, dass zufolge kleiner Konstruktionsfehler (Excentrisches Ausbohren, Gussfehler etc.) kleine Spannungsdifferenzen in den einzelnen Zweigen entstehen. Nach Prof. E. Arnold kann diesem Übelstande — falls eine Ringwicklung angewandt werden soll — durch die in Fig. 13 dargestellte Anordnung vorgebeugt werden, bei welcher die zwischen zwei Bürsten eingeschalteten Spulen sämtlichen Polen angehören.

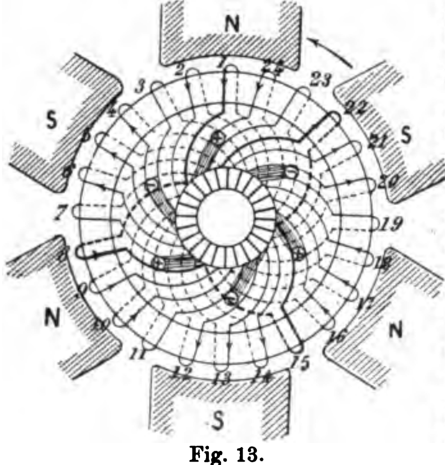


Fig. 13.

Die allgemeine Wicklungsformel für beliebige Polzahl ist wie folgt:

$$y = \frac{N_1 \pm p}{p}. \qquad (13)$$

Im vorliegenden Fall (Fig. 13) ist $N_1 = 24;\ p = 3;\ y = 7.$

Um die Stromstärke der kurzgeschlossenen Spule zu vermindern, kann die Armatur auch mit 2 getrennten Wicklungen (Fig. 14) versehen werden. Zu bemerken ist, dass in diesem Falle die Bürsten so breit gemacht werden sollten, dass sie gleichzeitig 3 Commutatorsegmente bedecken.

Fig. 14.

2. Trommelwicklungen.

Die Trommelwicklungen unterscheiden sich von den Ringwicklungen dadurch, dass alle Drähte am Umfang der Armatur angebracht sind. **Damit sich also die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Drähte summieren können, dürfen sich nie zwei unter der Einwirkung des nämlichen Poles befindliche Drähte aufeinander folgen,** sondern es müssen stets zwei Drähte miteinander verbunden werden, welche verschiedenen Polen angehören. Dabei kann die Wicklung eine fortschreitende sogen. **Wellenwicklung** (Wave-Winding) sein, wenn man nacheinander sämtliche Pole durchläuft, oder eine **Schleifenwicklung** (Lap-Winding), indem man vom zweiten Pole zunächst wieder nach dem ersten zurückkehrt und nur je um die Differenz der **Wicklungsschritte** vorwärts schreitet.

Mit Wicklungsschritten (englisch: spacing, französisch: pas) wird die Distanz zweier mit einander verbundener Elemente bezeichnet, d. h. die Anzahl Teilstrecken (Spulen, Drähte), um welche dieselben auseinander liegen. Bei Schleifenwicklung wechselt der Wicklungsschritt ab, bei Wellenwicklung kann er je nach der Zahl der Elemente event. konstant sein, was für die praktische Ausführung gewisse Vorteile gewährt.

Als allgemeine Regel mag jetzt schon bemerkt werden, dass die Wicklungsschritte y und y_1 stets ungerade Zahlen sein müssen. Eine Ausnahme hievon bilden nur diejenigen Wicklungen, welche in zwei Lagen ausgeführt werden, wobei man den Wicklungsschritt mit Bezug auf die Elemente einer Lage angibt.

Die Bezeichnung Wellen- oder Schleifenwicklung wird

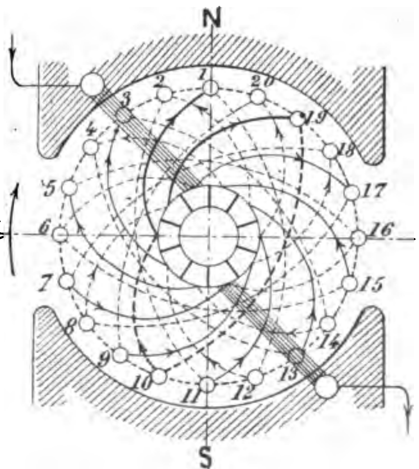


Fig. 15.

sofort klar, wenn man die Armaturoberfläche in einer Ebene ausgebreitet darstellt (Fig. 21 und 23).

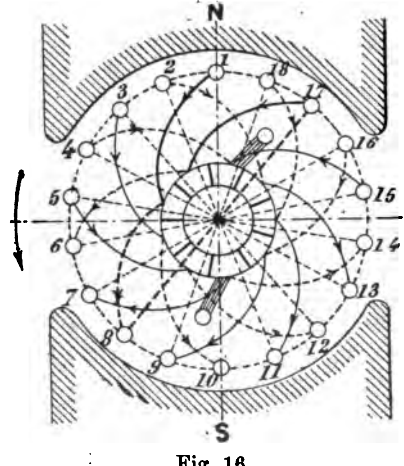


Fig. 16.

Fig. 15—18 zeigen verschiedene Schema von 2poligen Trommelwicklungen; Fig. 15, 16 u. 18 entsprechen dem Typus der Wellenwicklung, Fig. 17 demjenigen der Schleifenwicklung. Bei letzterer Anordnung müssen die beiden Wicklungsschritte y und y_1 mindestens gleich oder kleiner als der Polbogen b sein. Gegenüber den andern Wicklungen hat dieselbe den kleinen Vorteil, dass sich weniger Drähte kreuzen und die Drahtlänge etwas kürzer wird.

Bezüglich der Bürstenstellung ist zu bemerken, dass bei den Wicklungen 15 bis 17 die Bürsten in die Polaxe zu liegen kommen, während sie bei Fig. 18 in die neutrale Zone eingestellt werden müssen. Dieser Umstand ist öfters bei Motoren mit feststehenden Bürsten ausschlaggebend. Als Nachteil von der Anordnung Fig. 18 mag angeführt werden, dass die Wicklung etwas mehr Platz beansprucht.

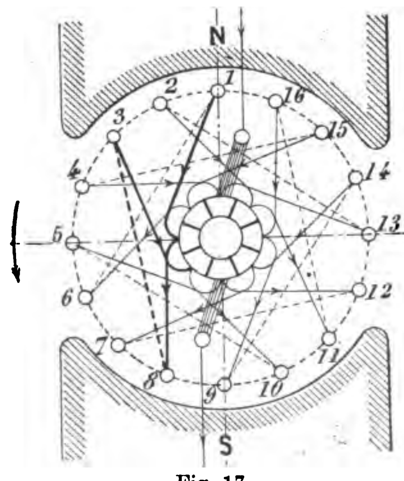


Fig. 17.

Für die Wellen-Wicklungen (15, 16 u. 18) gelten folgende Regeln:

$$y + y_1 = N_1 \pm 2$$

$$y \text{ u. } y_1 = \text{ungerade Zahlen}$$

$$N_2 = \frac{N_1}{2}$$

$$e_1 = E - 1$$

$$e_2 = \frac{2\,E}{N_2}.$$

Zahl der kurzgeschlossenen Elemente $= 2$.

Für Fig. 15 ist $y = y_1 = 9$, bei Fig. 16 ist $y = 7$, $y_1 = 9$.

Nutenarmaturen werden gewöhnlich in 2 Lagen ausgeführt (Fig. 19), im übrigen könnten die gleichen Regeln benutzt werden, wenn wir uns je einen Draht der zweiten Lage zwischen zwei der ersten Lage heruntergeklappt denken.

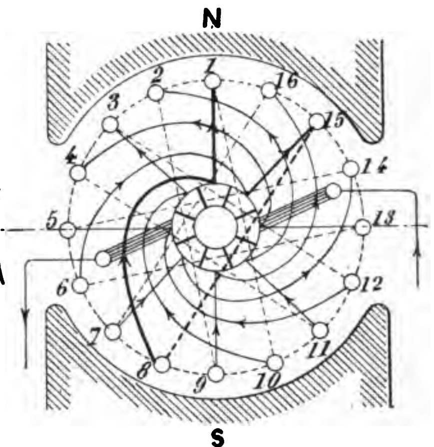


Fig. 18.

Noch besser jedoch ist es, wenn wir den Wicklungsschritt nur auf die erste Lage beziehen. In diesem Falle fällt die Beschränkung, dass y und y_1 ungerade Zahlen sein müssen, weg, und wir haben einfach die Regel zu beobachten

$$y + y_1 = N \pm 1.$$

In Fig. 19 ist beispielsweise $y = y_1 = 7$.

Für die **Schleifen-Wicklung** Fig. 16 gilt die Bedingung, dass y und y_1 ungerade Zahlen und

14. $y - y_1 = \pm 2$ sei.

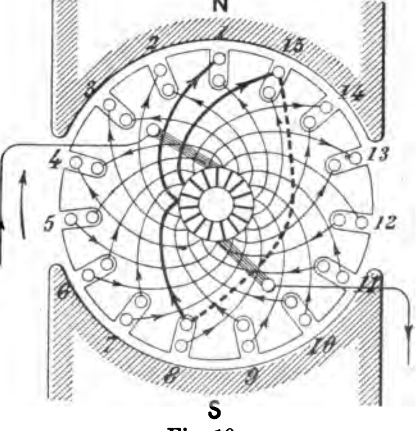


Fig. 19.

Fig. 20 und 22 stellen 2 Trommelwicklungen für 4polige Maschinen dar und zwar bezieht sich Fig. 20 auf eine Wellenwicklung, Fig. 22 auf eine Schleifen-

wicklung. Die hiezu gehörigen Abwicklungen in eine Ebene sind in Fig. 21 und 23 dargestellt und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

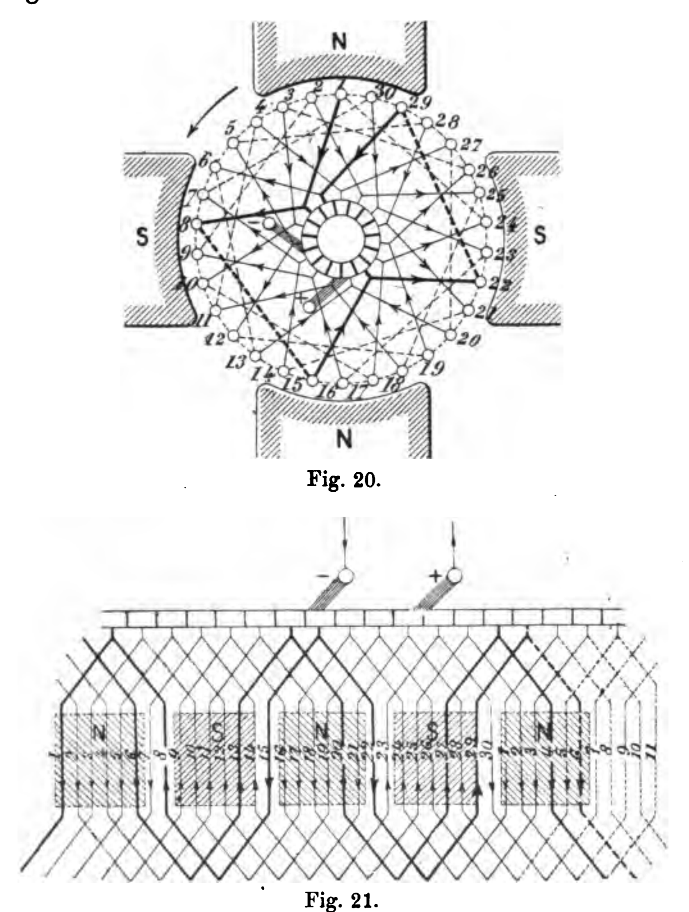


Fig. 20.

Fig. 21.

Fig. 24 stellt eine Wellenwicklung für 6 Pole dar. Verfolgt man die Stromrichtung in den einzelnen Drähten, so stellt sich heraus, dass bei der angegebenen Wellenwicklung zwei Bürsten zur Stromabnahme erforderlich sind, während bei der Schleifenwicklung stets soviel Stromabnahmen als Pole entstehen.

Die Schleifenwicklungen eignen sich deshalb nur für Parallelschaltungen.

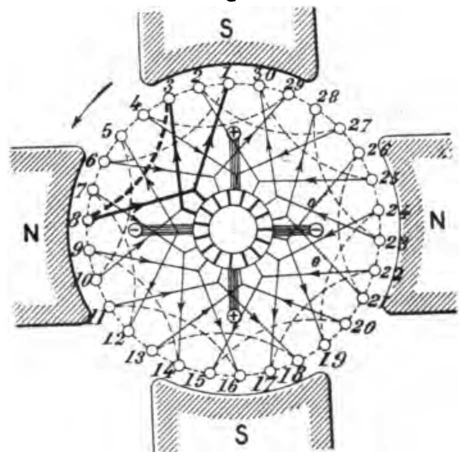


Fig. 22.

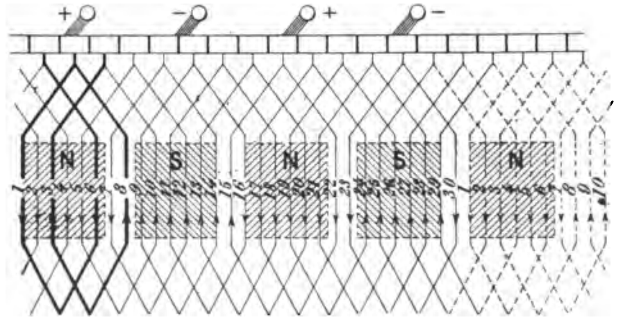


Fig. 23.

Für Wellenwicklung mit Serieschaltung haben wir folgende Beziehungen (die gleichen Formeln gelten auch für 2polige Maschinen):

$$N_2 = \frac{1}{2} N_1.$$

Für p gerade wird N_2 stets ungerade,
„ p ungerade „ N_2 gerade, wenn $y = y_1$ ist und
ungerade, „ y und y_1 um 2 Einheiten verschieden sind.

$$15. \qquad (y + y_1) = \frac{N_1 \pm 2}{p}.$$

(In Fig. 20 ist $y = y_1 = 7$.)

$$e_1 = E - p \cdot \frac{2\,E}{N_1} = E\left(1 - \frac{2\,p}{N_1}\right)$$

$$e_2 = \frac{2\,p \cdot E}{N_2}.$$

Der Bürstenwinkel α ist wie folgt:

$p =$	1	2	3	4
$\alpha =$	180	45	180	120

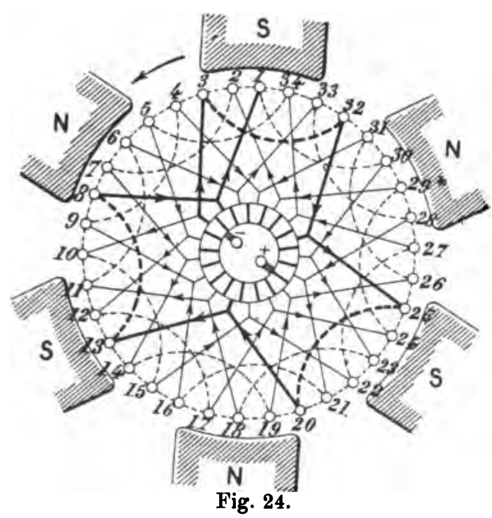


Fig. 24.

Es lässt sich übrigens auch die **Wellenwicklung für Parallelschaltung** benutzen, wie Prof. Arnold gezeigt hat. Ein solches Schema für eine 4polige und eine 6polige zeigen Figuren 25 u. 26 (vergl. Fig. 13). Die schon bei Fig. 13 erwähnten Vorteile sind auch dieser Wicklung zu eigen. Interessant ist es, dass der Kurzschluss einer Spule nicht bei gleichzeitiger Berührung zweier Collectorlamellen eintritt, sondern durch die beiden gleichnamigen Bürsten gebildet wird. Die Zeitdauer des Kurzschlusses kann daher durch Verschiebung der einen der beiden Bürsten beliebig reguliert werden, was bei der Schleifenwicklung nur durch Anwendung dickerer Bürsten möglich ist. Der einzige Nachteil derselben ist vielleicht der, dass die Intervalle zwischen den Drahtzahlen, für welche die Wicklung ausführbar ist, ziemlich gross sind.

Für **Wellenwicklung mit Parallelschaltung** gelten die Gleichungen

16. $$(y + y_1)\, p = N_1 \pm 2p.$$

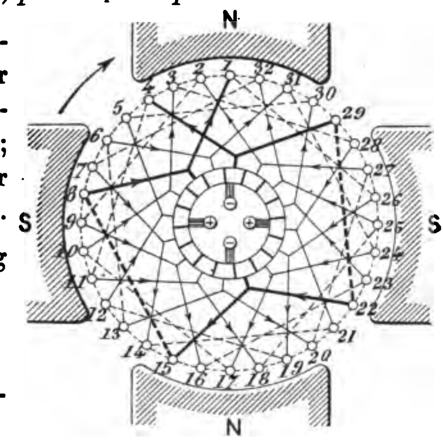


Fig. 25.

Damit die Wicklung ausführbar ist, muss entweder $y = y_1$ oder eine um $2p$ davon verschiedene Zahl sein; praktisch kommt natürlich nur der erstere Fall in Betracht.

Eine zweite Bedingung ist, dass

$$y \text{ und } \frac{N_1}{2}$$

keinen gemeinschaftlichen Teiler haben.

(Auf die Figuren 25 und 26 angewandt, ist
im ersten Beispiel $y = y_1 = 7$,
im zweiten Falle $y = y_1 = 5$.)

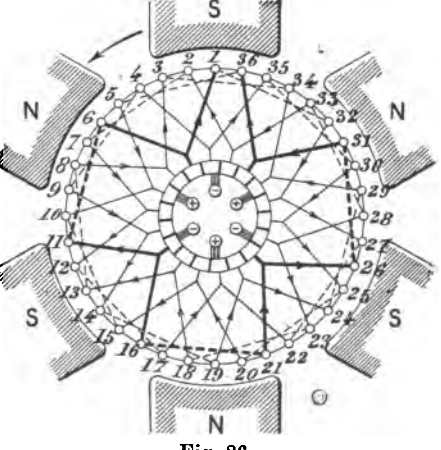


Fig. 26.

Es mag zum Schlusse noch eine **Wicklung mit Parallelschaltung** erwähnt werden, welche sich in hohem Grade für Maschinen mit hohen Stromstärken eignet (siehe Silv. Thompson, Dynamo Electric Machinery).

Dieselbe besteht im Grunde genommen aus 2 oder 3 getrennten Wicklungen mit eigenem Commutator, welche so übereinander gelegt werden, dass die Drähte und Lamellen zwischen einander gelegt werden. Wertvoll wird dieselbe

deshalb, weil durch jede Wicklung nur der halbe oder dritte Teil des Stromes cirkuliert, so dass beim Unterbruche des Kurzschlusses durch die Bürsten nur ein Bruchteil des normalen Stromes unterbrochen wird. Die Funkenbildung wird dadurch bedeutend reduziert; auch die Erwärmung des Commutators infolge von Foucouldströmen fällt kleiner aus. (Vergl. Fig. 14.)

Fig. 27 stellt eine analoge Anordnung mit 4 verschiedenen Stromkreisen vor.

Die allgemeine Wicklungsgleichung lautet:

$$y + y_1 = \frac{N_1 \pm 2a}{p}. \qquad (17.)$$

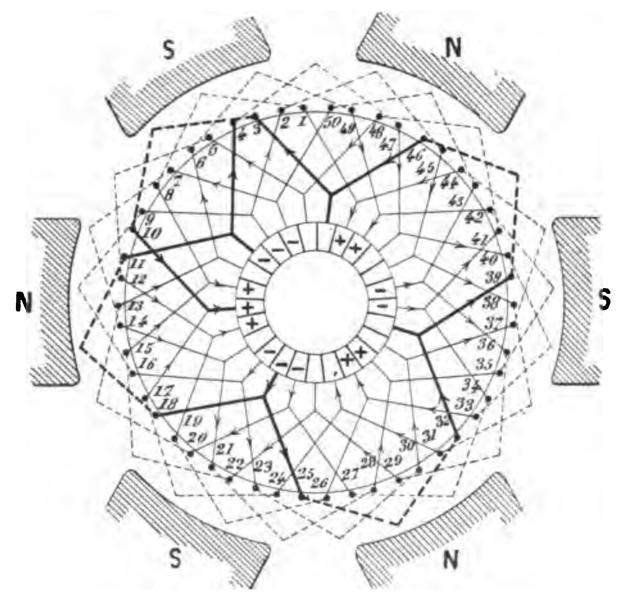


Fig. 27.

Für $a = 2$ erhält man 2 Stromabnahmestellen. Die Bedingung einer einzigen geschlossenen Wicklung ist, dass $\frac{N_1}{2}$, $y + y_1$ und a keinen gemeinsamen Teiler besitzen.

In Fig. 27, welche dem Buche von E. Arnold entnommen ist, ist $a = 4$, $N_1 = 50$, $y_1 = y = 7$.

Anmerkung. Statt die Wicklungen an den Stirnflächen der Armatur auszuführen, können dieselben auch als sogenannte Mantelwicklungen hergestellt werden; wir brauchen uns die Wicklungen Fig. 21 und 23 nur um eine Armatur gelegt denken. Man erreicht dadurch eine bedeutend bessere Abkühlung, dagegen wird die Armaturlänge etwas vergrössert.

3. Vergleiche der Ring- und Trommelwicklungen.

Nach der Form der Eisenbleche lassen sich die Armaturen wie folgt einteilen:

a) Glatte Armaturen (Fig. 28, Anordnung *a*), bei welchen die Drähte in einer oder mehreren Lagen gleichmässig am Umfange verteilt sind;

b) Zacken- oder Nutenarmaturen (Anordnung *b*), bei welchen die Drähte in Kanälen untergebracht werden;

c) Locharmaturen (Anordn. *c* u. *d*) zuerst von Wendström angewandt;

d) Locharmaturen, bei welchen die Nuten nicht ganz geschlossen sind (Anordn. *e*).

Die letztere Anordnung ist derjenigen von Fig. *c* oder *d* vorzuziehen, weil der magnetische Widerstand des Selbstinduktionsstromes, der beim Kurzschlusse einer Spule durch die Bürsten in der neutralen Zone entsteht, vergrössert wird.

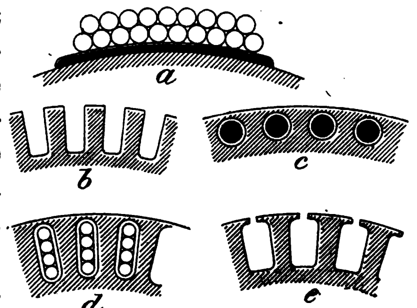


Fig. 28.

Glatte Armaturen sind selbstverständlich am billigsten herzustellen, wenn man vom übrigen Teil der Maschine absieht, dagegen haben sie verschiedene Nachteile. Der wichtigste ist der, dass die Armatur, um den Luftabstand nicht allzusehr zu vergrössern, nicht genügend ausgenutzt werden kann, ferner lassen sich solche Ma-

schinen nicht so stark sättigen, wie solche mit Zackenarmaturen, sie werden dementsprechend auch etwas empfindlicher für Tourenschwankungen.

Nicht zu vergessen ist auch, dass die Ersparnis an Herstellungskosten, welche eine glatte Armatur event. noch haben kann, reichlich durch die Mehrkosten des Kupfers auf den Magneten überwogen wird, so dass der Gesamtpreis der Maschine kaum beeinflusst wird.

Bezüglich ihrer praktischen Vorzüge und Nachteile lässt sich von Ring- und Trommelwicklungen folgendes anführen:

Besondere Vorzüge des Gramme-Ringes:

1. Die Spannung zwischen zwei nebeneinander liegenden Armaturdrähten ist Null, infolge dessen sehr grosse Isolationssicherheit. Gramme-Ringe können, wie eine Reihe von Anlagen, ausgeführt durch die Maschinenfabriken Oerlikon und Thury, beweisen, bei sorgfältiger Ausführung bis zu 2000—3000 Volt Spannung konstruiert werden.
2. Jeder einzelne Draht kann bei allfälligen Reparaturen in kürzester Zeit und ohne besondere Mühe ersetzt werden; überhaupt ist die ganze Wicklung sehr leicht herzustellen.
3. Besondere Driving horns (in die Armatur eingelassene hervorragende Keile, Stifte etc. zum Mitnehmen der Drähte bei glatten Armaturen) fallen weg, da bei den meisten Konstruktionen durch die Speichen des Armatursternes natürliche Mitnehmer geschaffen sind.
4. Die Zahl der Kollektorlamellen kann gleich der Anzahl Drähte angenommen werden; wichtig bei Armaturen mit sehr wenigen Drähten.

Hauptsächliche Nachteile sind:

1. Sämtliche Drähte im Innern des Ringes bilden nur schädlichen Widerstand, bei höhern Sättigungen soger treten auch Kraftlinien ins Innere und erzeugen in diesen Drähten Ströme von entgegengesetzter Richtung.
2. Der gesamte disponible Armaturquerschnitt $(D \times l)$ wird nur sehr schlecht ausgenützt.
3. Die Armaturreaktionen sind infolge der im Innern des Ringes befindlichen Drähte grösser als bei der Trommel.
4. Um die Wicklung im Innern der Armatur unterzubringen muss der Durchmesser grösser gemacht werden, als dies aus elektrischen Rücksichten notwendig wäre. Dieser Übelstand wird besonders bei kleineren Maschinen fühlbar.
5. Der Armaturstern muss aus Bronce hergestellt sein.

Vorteile der Trommel:

1. Sehr günstige Ausnutzung des Armaturquerschnittes, Trommeln fallen daher im Allgemeinen ca. 12—15 % kleiner aus als Ringarmaturen.
2. Geringere Armaturreaktionen.
3. Die Trommelwicklung lässt sich auch sehr leicht für mehrpolige Maschinen mit nur 2 Bürsten ausführen.
4. Der Armaturstern darf aus Guss sein.
5. Möglichkeit die Wicklung nach Schablonen auszuführen.

Hauptsächliche Nachteile der Trommel:

1. Konstruktiv schwieriger auszuführende Wicklung; beim Ersetzen von einzelnen reparaturbedürftigen Drähten muss fast die ganze Wicklung weggenommen werden.
2. Insofern nicht Zacken- oder Locharmaturen verwendet werden, sind Driving horns notwendig, dies besonders bei grösseren Maschinen, da hier die blosse Reibung zum Mitnehmen der Drähte nicht mehr genügt.
3. Geringere Isolationsfähigkeit besonders bei Knäuelwicklungen.
4. Die Zahl der Collectorlamellen kann höchstens gleich der halben Drahtzahl sein.

4. Bürstenverschiebung, Ursachen der Funkenbildung.

Wir müssen uns vor der Hand mit einigen preliminären Angaben begnügen, da eine Berechnung dieser Erscheinungen die Kenntnis der Magnetisierungsgesetze voraussetzt. (Vollständigere Angaben finden sich in Kap. VI.)

Bei sämtlichen Maschinen macht sich eine mehr oder weniger grosse Bürstenverschiebung notwendig, um einen funkenlosen Gang zu erzielen und zwar müssen bei Generatoren die Bürsten im Sinne der Drehrichtung, bei Motoren entgegengesetzt der Drehrichtung, verschoben werden.

Diese Bürstenverschiebung hat nach der landesüblichen Auffassung, welche wir hier nicht diskutieren wollen, einen zweifachen Grund: Erstens wird durch die Armaturreaktion eine Verzerrung der Felder mithin eine Änderung der Lage der neutralen Zone bewirkt, ferner ist eine weitere kleine Bürstenverschiebung notwendig, um die zur Umkehrung des Stromes in der kurz ge-

schlossenen Armaturspule erforderliche entgegengesetzte *EMK* zu erzeugen.

Wir wollen diese beiden Erscheinungen auseinander halten: Was zunächst die **Armaturreaktion** anbelangt, so lässt sie sich auf die gleichen Ursachen zurückführen, wie die elektromagnetischen Erscheinungen einer stromdurchflossenen Spule. Kompliciert wohl wird deren Wirkungsweise, weil die magnetische Axe der Armatur unter einem Winkel zu derjenigen der Magnete steht.

Es bedeute in Fig. 29 *m q* die neutrale Zone. Sämtliche Armaturdrähte oberhalb *m q* sind von einem gleichgerichteten Strom durchflossen, desgleichen alle Drähte unterhalb *m q*, letztere jedoch in umgekehrter Richtung. Eine naturgemässe Folge davon ist, dass in der Armatur magnetische Kraftlinien erzeugt werden, welche ungefähr den in Fig. 29 angedeuteten Verlauf nehmen. Während jedoch die von den Magneten herrührende Kraftliniendichte längs *n o p* eine gleichmässige ist, nimmt die von der Armatur allein erzeugte Dichte, vom Punkte *o* ausgehend, gegen die Polspitzen positiv und negativ stetig zu, fällt aber sofort wieder rasch herunter (siehe Fig. 30).

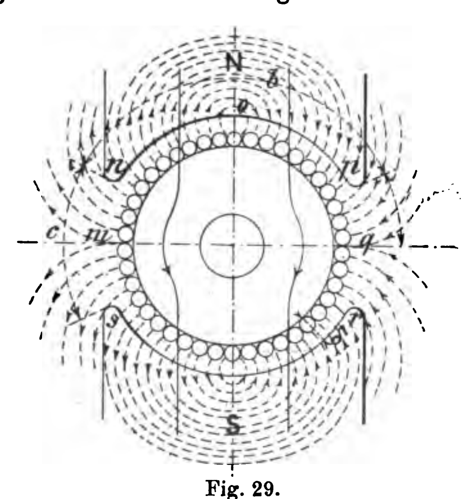


Fig. 29.

Trägt man die Magnetinduction *I* und die Armaturreaktion *II* graphisch auf, so zeigt die Kurve *III* die Gestaltung des combinierten magnetischen Feldes für einen Generator. Beim Motor ist für gleiche Drehrichtung der Ankerstrom umgekehrt, das combinierte Magnetfeld würde also die durch Kurve *IV* veranschaulichte Form annehmen.

Da die Bürsten in die Lage gebracht werden müssen, wo die Induktion nahezu gleich Null ist, findet folglich beim Generator eine

Verschiebung in der Drehrichtung, beim Motor entgegengesetzt der Drehung statt. Wie Eingangs erwähnt, müssen die Bürsten zur Commutierung des Stromes stets etwas über die neutrale Zone heraus verschoben worden (und zwar immer im Sinne der Drehrichtung); beim Generator entspricht dies folglich einer addionellen Bürstenverschiebung, während umgekehrt beim Motor der Bürstenwinkel dadurch reduciert wird. Es erklärt sich daraus die Möglichkeit, bei gutkonstruierten Motoren fixe Bürsten zu verwenden, was besonders von Wichtigkeit ist, wenn der Motor vorwärts und rückwärts gehen soll.

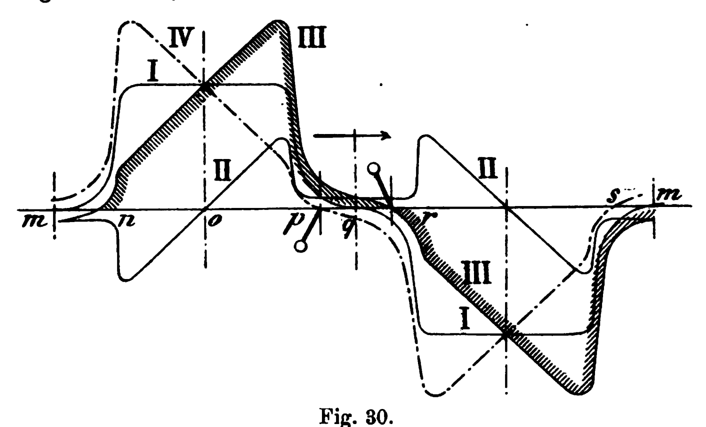


Fig. 30.

Die Fig. 30 lässt auch leicht erkennen, dass unter Umständen die Kraftliniendichte der Armaturreaktion diejenige der Magnete überwiegen kann. Die Pole würden dadurch an ihren Ecken umgekehrt polarisiert. Solche Verhältnisse sind natürlich unzulässig und kommen nur bei schlechten Maschinen vor.

Damit dieser Fall nicht eintritt, muss

18. $$\frac{N J}{2 p_1 D \pi} = k < k\,max = \frac{20}{4 \pi} \cdot B_l \cdot \frac{\delta}{b} \text{ oder}$$

19. $$N < 6{,}37 \cdot \frac{B_l}{J} \cdot \frac{\delta \cdot p \cdot p_1}{\beta}.$$

B_l Felddichte per cm^2.

δ, b siehe Fig. 29; $\beta = \frac{b \cdot 2p}{D\pi}$.

J totaler Maschinenstrom.

Die Ableitung dieser Formel findet sich in Kap. VI. k bedeutet die Anzahl Ampère-Windungen pro cm Armaturumfang und ist eine für die Berechnung sehr bequeme Grösse.

Was nun die Ursachen der Funkenbildung anbelangt, so soll dieselbe an Hand der Figur 31 gezeigt werden.

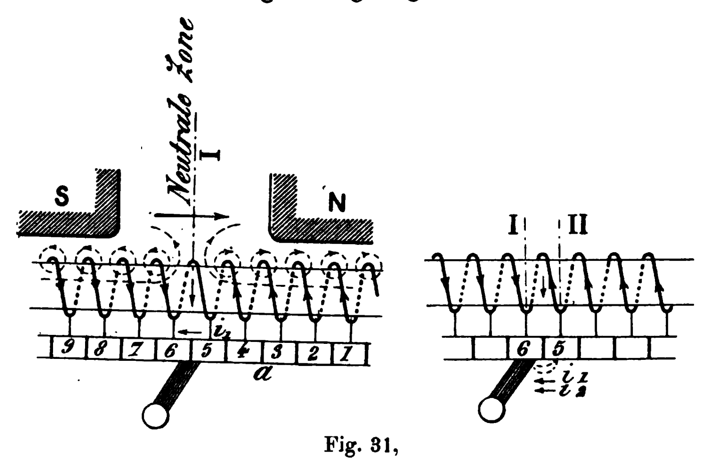


Fig. 31.

Betrachtet man die Wicklung in der Richtung der Bewegung, so hat der darin fliessende Strom bis zum Kurzschluss die Richtung des Uhrzeigers, von da an umgekehrte Richtung.

Jeder Armaturdraht erzeugt nach früherem magnetische Linien (Armaturreaktion), welche um denselben kreisen. Die Richtung derselben ist in der Fig. 31 durch punktierte Linien angedeutet. Sobald nun eine Spule zum Kurzschluss gelangt, hat der Strom die Tendenz, auf Null zu sinken, die magnetisierende Kraft und mit ihr die Kraftlinienzahl nimmt dadurch ab. Wir haben aber bereits gesehen, dass in einer Spule, um welche Kraftlinien kreisen, deren Gesamtzahl sich ändert, eine *EMK* erzeugt wird. Bestimmen wir nun die Richtung dieses Selbstinduktionsstromes nach der

Stromregel Seite 6, so sieht man, dass derselbe gleiche Richtung wie der ursprüngliche Strom hat; der ursprüngliche Strom kann also nicht plötzlich abnehmen, sondern er vermindert sich allmählich nach einem Gesetze, das wir weiter unten behandeln wollen.

Dieser Vorgang wird aber noch komplicierter durch eine weitere Erscheinung. Unmittelbar nach Aufhebung des Kurzschlusses fliesst nämlich durch die Spule der volle Armaturstrom in entgegengesetzter Richtung. Die gleiche Ursache, welche eine Verzögerung in der Abnahme des ursprünglichen Stromes herbeiführte, tritt nun auch hemmend dem Anwachsen des umgekehrten Armaturstromes entgegen, so dass derselbe genötigt ist, seinen Weg von der Lamelle 5 durch die Luft nach der Bürste zu nehmen. Die naturgemässe Folge ist eine Feuererscheinung, die um so stärker auftritt, je geringer die Zahl der Commutatorlamellen, resp. je grösser die Zahl der zwischen zwei Lamellen eingeschalteten Drähte und je grösser der Armaturstrom ist.

Um ein Feuern zu verhüten, müssen die Bürsten soweit über die neutrale Zone verschoben werden, dass der in der Spule erzeugte entgegengesetzte Strom (i_s) weniger dem noch vorhandenen Selbstinduktionsstrom (i_1) annähernd gleich dem normalen Strom in umgekehrter Richtung ist.

Es mag hier der Platz sein für eine Wicklungsmethode von Sayers, welche den gleichen Zweck ohne Bürstenverschiebung anstrebt (die betreffende Wicklung ist zuerst im Electrician beschrieben).

Die Armatur ist mit 2 Wicklungen versehen, der Hauptwicklung, welche in gewohnter Weise berechnet werden kann, und der Kompensationswicklung.

Der Unterschied gegenüber gewöhnlichen Armaturen besteht darin, dass die Ableitungen der Hauptwicklung nicht direkt zum Commutator geführt werden, sondern mit der um einen gewissen Betrag nach rückwärts verschobenen Kompensationswindung in Serie geschaltet sind. Bei letzterer ist die Wicklungsrichtung umgekehrt.

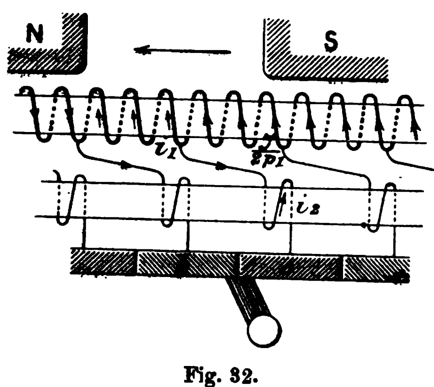


Fig. 32.

Zum besseren Verständnisse sind die beiden Wicklungen in Fig. 32 auf verschiedenen Armaturen angebracht. Diese verschobene Kompensationswicklung hat nun den Zweck, den Commutationsstrom zu erzeugen und da sie direkt dem Pole ausgesetzt ist, genügt also eine einzelne Wicklung, um die Selbstinduktion einer grösseren Spule zu überwinden.

In Fig. 33 ist eine im Prinzipe gleiche, für die Ausführung und eventuelle Regulierung bequemere Methode von Sayers angegeben, bei welcher ein Hülfspol benutzt wird. Nach den Angaben

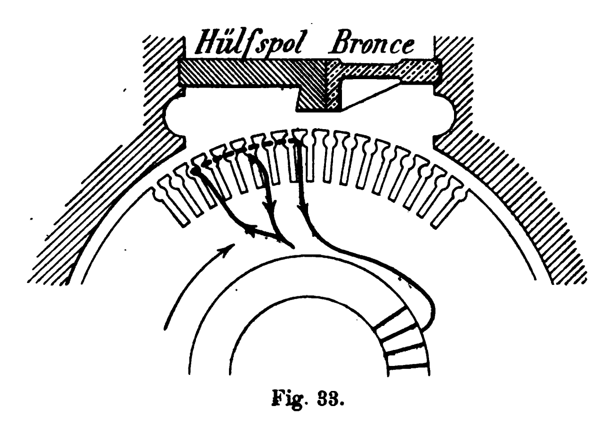


Fig. 33.

von Sayers scheint diese Wicklung von sehr gutem Erfolg zu sein. Da in der Kompensationswicklung nur während sehr kurzer Zeit ein Strom cirkuliert, gestattet dies, deren Querschnitt entsprechend kleiner zu halten, so dass der Wicklungsraum auf diese Weise kaum wesentlich vergrössert wird.

B. Armaturverluste.

Die Gleichung 5 lässt sich nicht ohne weiteres zur Berechnung von Armaturen benutzen, weil sie in der angegebenen Form kein Urteil über den Gang, Nutzeffekt und die Erwärmung der Maschine gestattet.

Bevor deshalb an die eigentliche Berechnung von Armaturen geschritten werden kann, ist es unerlässlich, die verschiedenen in denselben auftretenden Verluste einer genauen Berechnung zu unterwerfen.

Die Armaturverluste setzen sich wie folgt zusammen:

1. Voltverlust im Kupfer;
2. Verlust durch Ummagnetisierungsarbeit (Hysteresis);
3. Verlust durch Foucaultströme (Wirbelströme);
4. Reibungsverluste;
5. Spannungsabfall durch die Armaturreaktion.

Obwohl der letztere kein eigentlicher Verlust ist, indem er keinen äquivalenten Energieverlust zur Folge hat, so mag er doch hier aufgeführt werden, weil dadurch die Capacität der Maschine vermindert wird.

1. Ohm'scher Spannungsverlust.

J totaler Maschinenstrom in Ampère;

p_1 Anzahl Stromverzweigung à 2 Ästen gleich halber Zahl Bürstenstifte (nicht Bürsten, weil auf dem nämlichen Stift mehrere Bürsten angebracht werden können);

$e = \varepsilon E$ Spannungsverlust in Volt;

R Widerstand eines Stromkreises zwischen 2 Bürsten bei 0^0 C. (Da der Widerstand bei der üblichen Maschinenerwärmung um ca. 20 % grösser ist, soll dies durch den Koefficient 1,2 berücksichtigt werden.);

N totale Zahl Drähte rings um die Armatur;

$\mathfrak{L}$ mittlere Länge einer Windung bei Gramme-Armaturen, bei Trommeln gleich Drahtlänge sämtlicher Drähte samt Verbindungen geteilt durch N, in Meter;

s Drahtquerschnitt in m/m^2.

20. $$R = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N}{60 \,.\, s \,.\, 2\, p_1} \,.\, 1{,}2 = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N}{100 \,.\, s \,.\, p_1}.$$

21. $$e = \frac{R \,.\, J}{2\, p_1} = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N \,.\, J}{60 \,.\, s\, 4\, p_1^2} \,.\, 1{,}2 = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N \,.\, J}{200 \,.\, s\, p_1^2}.$$

Der gesamte Wattverlust in der Armatur ist folglich:

22. $$w = e J = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N J^2}{60 \,.\, s\, 4\, p_1^2} \,.\, 1{,}2 = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N J^2}{200 \,.\, s \,.\, p_1^2}.$$

Bezeichnet man mit i die Stromdichte, d. h. die Anzahl Ampères per $^m/_{m^2}$ Drahtfläche, so ist

$$J = s \,.\, i \,.\, 2\, p_1, \text{ folglich}$$

23. $$e = \frac{1{,}2 \mathfrak{L} \,.\, N \,.\, s i \,.\, 2\, p_1}{60 \,.\, s \,.\, 4\, p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N i}{100\, p_1}.$$

24. $$w = \frac{1{,}2 \mathfrak{L} \,.\, N \,.\, s^2 \,.\, i^2 \,.\, 4\, p_1^2}{60 \,.\, s \,.\, 4 \,.\, p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N \,.\, s i^2}{50}.$$

$\mathfrak{L} \,.\, N s$ bedeutet aber nichts anderes als den Kupferinhalt in $^c/_{m^3}$. Das Kupfergewicht einer Armatur beträgt folglich für einen gesamten Wattverlust w

25. Gewicht $= 0{,}535 \, \frac{w}{i^2}$ $^k/_g$ in kaltem Zustande, oder mit

Berücksichtigung der Erwärmung auf ca. 55° C.

Gewicht = ca. $0{,}45 \, \frac{w}{i^2}$ $^k/_g$.

Diese Formel ist insofern von Nutzen, als sie für Projektberechnungen, wo eine sehr grosse Genauigkeit nicht verlangt wird, gestattet, ohne vorherige Aufzeichnung der Armatur das Kupfergewicht zu bestimmen.

Beispiel 1. Wie gross ist das Kupfergewicht einer Maschine von 500 Kilowatt bei 3 % Verlust und einer Beanspruchung $i = 2{,}5$ Ampères pro $^m/_{m^2}$?

$$\text{Gewicht} = 0{,}45 \,.\, \frac{0{,}03 \,.\, 500{,}000}{6{,}25} = 1080 \ ^k/_g.$$

Tabelle der Voltverluste pro 100 $^{m}/$ bei 0° C.

i	e	i	e	i	e	i	e
0,1	0,166	0,9	1,50	1,7	2,83	3	5,00
0,2	0,333	1,0	1,66	1,8	3,00	3,2	5,33
0,3	0,500	1,1	1,83	1,9	3,16	3,4	5,66
0,4	0,666	1,2	2,00	2,0	3,33	3,6	6,00
0,5	0,833	1,3	2,16	2,2	3,66	3,8	6,33
0,6	1,000	1,4	2,33	2,4	4,00	4	6,66
0,7	1,166	1,5	2,50	2,6	4,33	4,5	7,50
0,8	1,33	1,6	2,66	2,8	4,66	5	8,00

Beispiel 2. Die Armatur einer 2poligen Maschine, für 50 A. und 65 V. gebaut, habe 200 Drähte von je 3,3 $^{m}/_{m}$ Dicke (nackt), folglich ist

$$i = \frac{50}{2} \cdot \frac{1}{\frac{3{,}3^2 \cdot \pi}{4}} = 2{,}9 \text{ A.}$$

Länge einer Windung angenommen $= 0{,}7 \ ^{m}/$;

Länge der Windungen zwischen 2 Bürsten $= \frac{200}{2} \cdot 0{,}7 \ ^{m}/ \quad = 70 \ ^{m}/$;

folglich Spannungsverlust (nach obig. Tab. interpoliert)

$$e = 0{,}7 \cdot 4{,}83 = 3{,}4 \text{ V.},$$

oder mit Berücksichtigung der Erwärmung $= 4{,}1$ V.

totaler Verlust in Watts $= 4{,}1 \cdot 50 = 205 = 6{,}3$ %.

Beispiel 3. Welches sind die Armaturverluste in einer 6poligen Maschine für 1000 A. und 20 V., wenn $N = 80$, $p_1 = 3$, $d = 9 \ ^{m}/_{m}$?

Länge einer Windung $= 0{,}9 \ ^{m}/$.

Länge der Windungen zwischen 2 Bürsten $= \frac{80 \cdot 0{,}9}{6} = 12 \ ^{m}/$.

Beanspruchung $i = \frac{1000}{2 \cdot p_1 \cdot s} = \frac{1000}{2 \cdot 3 \cdot 63{,}5} = 2{,}6$ A.

Daher Spannungsverlust (nach Tabelle) $= 4{,}33 \cdot 0{,}12 = 0{,}52$ V. (0,62 heiss).

Totaler Wattverlust $= 0{,}52 \cdot 1000 \cdot 520$ Watts $= 2{,}6$ % (3,1 % heiss)

Anmerkung. Sehr bequem für solche Rechnungen ist die am Schlusse des Buches stehende Tab. II.

2. Hysteresis.

Fasst man einen beliebigen Querschnitt des Armatureisens ins Auge und verfolgt man seine Magnetisierung während einer ganzen Umdrehung, so ersieht man, dass sich die Richtung der durch denselben fliessenden Kraftlinien so viele Mal ändert, als Pole vorhanden sind. Die minimale Magnetisierung tritt stets ein, wenn dieser Querschnitt mit einer Polaxe zusammenfällt. An dieser Stelle ist sie gleich Null. Von hier an nimmt die Kraftliniendichte beinahe proportional der fortschreitenden Bewegung zu, bis sie in der neutralen Zone ein Maximum erreicht, um nachher wieder auf Null zurückzukehren. Es liegt nun dem Eisen eine gewisse Trägheit inne, welche den Magnetismus auf gleicher Höhe zu erhalten sucht. Die naturgemässe Folge ist, dass bei zunehmender Magnetisierung die Kraftliniendichte geringer, bei abnehmender Erregung höher ausfällt, als sich bei länger andauernder gleichmässiger Erregung ergeben würde. Fig. 34, welche wir dem Buche von Silv. Thompson entnehmen, zeigt einen solchen Kreislauf nach Versuchen an weichem Stahldraht.

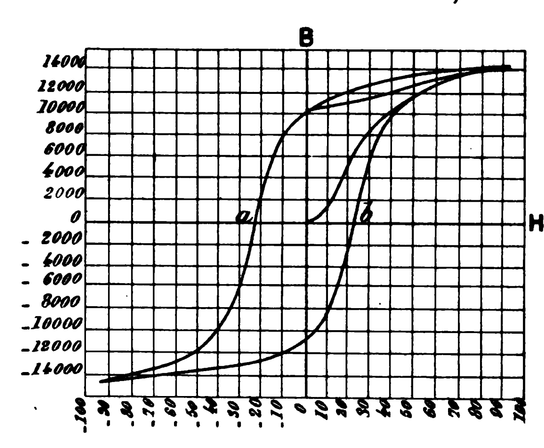


Fig. 34.

Die zwischen den Kurven a und b enthaltene Fläche stellt den sogenannten Hysteresisverlust dar.

Dieser Verlust ist innerhalb den praktisch in Frage kommenden Grenzen genau proportional der Zahl Perioden oder Cycles ω (2malige Polwechsel) und dem Eisengewichte. Die erste experimentelle Untersuchung dieser Erscheinung verdanken wir in erster Linie

Prof. J. A. Ewing*), von dem auch die in nachstehender Tabelle enthaltenen Zahlen herrühren. Die Versuchsreihe *b* bezieht sich auf neuere Experimente, angestellt an 5 verschiedenen Transformatorblechen der Firma Sankey & Sons, London. (Siehe Elektrotechnische Zeitschrift, Mai 1895.)

Kraftlinien pro cm^2 *B*.	Wattverlust pro cm^3 während einer vollständigen Periode	
	Versuchsreihe *a*	Versuchsreihe *b*
1000	—	90 bis 120 $\times 10^{-7}$
2000	480 $\times 10^{-7}$	220 „ 400
3000	800	410 „ 790
4000	1230	645 „ 1220
5000	1700	910 „ 1710
6000	2200	1200 „ 2250
7000	2760	1530 „ 2940
8000	3450	1920 „ 3720
9000	4200	2320 „ 4550
10000	5000	—
11000	5820	—
12000	6720	—
13000	7650	—
14000	8650	—
15000	9670	—

Es mag hier gleich bemerkt werden, dass die obigen Blechsorten von besonders guter Qualität sind, indem ihre Verwendung für Transformatoren einen möglichst geringen Hysteresisverlust erheischt.

Von grossem praktischem Werte sind die von Chas. Proteus Steinmetz veröffentlichten Arbeiten (siehe Elektrotechnische Zeitschrift, Heft 4, 1892), worin sehr einfache Formeln für die Berechnung des Hysteresisverlustes angegeben sind.

---

*) Phil. Trans. Th. II. Nr. 238, 1885; ferner Electrician, Juni 1890 etc.

Nennt man

$\omega = \frac{n\,p}{60}$ die Periodenzahl,

V den Eiseninhalt in cm^3, und

η einen Zahlen-Koefficient, so ist nach Steinmetz

$$26.\quad \text{Hysteresisverlust} = \eta \,.\, B^{1,6} \,.\, \omega \,.\, V \,.\, 10^{-7} \text{ Watts.}$$

Die Werte von η und $\eta \,.\, B^{1,6}$ können auch den am Schlusse des Buches enthaltenen Tabellen IV, V und VI entnommen werden.

Beispiel. Die auf Seite 39 angeführte 6 polige Maschine läuft mit 800 Touren per Minute. Wie gross ist der durch Hysteresis verursachte Verlust, wenn der Cubikinhalt des Armatureisens 19000 cm^3 ist und die maximale Kraftliniensättigung 8000 Linien beträgt?

$$\text{Perioden } \omega = \frac{p \,.\, n}{60} = \frac{3 \,.\, 800}{60} = 40.$$

Nach der Versuchsreihe *a* von Ewing finden wir 3450×10^{-7} Watt pro Periode und cm^3. Vergleichen wir diese Zahl mit der Tabelle VI nach Steinmetz, so entspricht dieselbe so ziemlich der Rechnung für $\eta = 0{,}002$.

Mit Rücksicht auf die verwendete Eisensorte dürften wir jedoch der Wirklichkeit näher kommen, wenn wir $\eta = 0{,}003$ setzen, dann ist nach Tab. VI

der Wattverlust $= 5274 \,.\, 40 \,.\, 19000 \,.\, 10^{-7} = 400 = 2\,\%$.

Es ist nun die Frage offen:

Wie wären die Eisendimensionen zu verändern, wenn man statt dem gefundenen Verlust von 400 Watt nur 300 zulassen wollte?

Für 300 Watt ist angenähert, indem wir schätzungsweise statt 19000 cm^3 21000 cm^3 annehmen.

$$\eta \,.\, B^{1,6} = \frac{300 \,.\, 10^{-7}}{40 \,.\, 21000} = 3580.$$

Nach der Tabelle VI liegt B hiefür zwischen 6000 und 6500 Linien, die gewünschte Sättigung ist daher vielleicht 6300.

3. Verlust durch Foucaultströme.

Die unter diesem Namen bekannten schädlichen Wirbelströme treten nicht nur im Kupfer, sondern auch im Eisen auf, sobald dasselbe nicht genügend lamelliert ist. Foucaultströme finden sich allgemein immer vor, wenn massive Körper in einem magnetischen Feld bewegt oder einer variablen Magnetisierung ausgesetzt werden.

Ihre Wirkungsweise besteht darin, dass durch die ungleichmässige Verteilung der Kraftlinien in der Masse lokale Ströme induciert werden, welche einen entmagnetisierenden Einfluss ausüben und dadurch das Durchpassieren der Kraftlinien beeinträchtigen (Schirmwirkung). Eigentümlicher Weise beschränken sich die Foucaultströme mehr oder weniger auf die Oberfläche, d. h. sie dringen nicht sehr stark ins Innere hinein und zwar um so weniger, wenn die Dicke sehr gross ist.

Sie treten z. B. sehr leicht an den Polecken der Magnete auf, wenn der Luftabstand δ sehr klein ist und zwar nur an einer Ecke (siehe Fig. 35), ferner bei glatten Armaturen mit massiven Kupferbarren, und äussern sich stets durch eine entsprechende Erwärmung. Bei glatten Armaturen darf folglich der Drahtdurchmesser nicht so stark gewählt werden, wie bei Zackenarmaturen, wo die Kraftlinien ihren Verlauf durch die Zacken nehmen können und deshalb nur verhältnismässig wenige Linien in das Kupfer eindringen. Man rechnet deshalb im allgemeinen eine Drahtdicke von ca. 15—20 $^{m}/_{m}$ als Maximum.

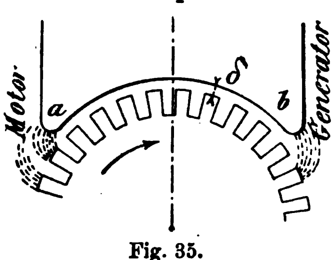


Fig. 35.

Eine Eigentümlichkeit der Foucaultströme besteht darin, dass sie mit dem Quadrate der Periodenzahl zunehmen. Ist die letztere genügend gross, so fällt auch die Schirmwirkung entsprechend kräftig aus, und dieser Umstand hat wieder seine bestimmten Vorteile, von welchen in der Praxis Anwendungen gemacht werden.

So dürfen beispielsweise die Deckplatten der Transformatorbleche unbedenklich aus Gusseisen hergestellt werden, da die Schirmwirkung bei 40—50 Perioden ein Eindringen der Kraftlinien fast gänzlich verhindert. Für Armatursterne von Grammeringen dagegen muss stets Bronce verwendet werden, weil sich Gussarme zu stark erwärmen würden.

Diese Beobachtung hat der Verfasser in eklatanter Weise an einer Drehstromdynamo mit Gramme-Armatur und gusseisernem Stern machen können. Nicht nur erwärmte sich der Stern ausser-

gewöhnlich, sondern es stellte sich auch bei Belastung eine bedeutende Spannungsdifferenz in den 3 Phasen heraus.

Leider sind die allgemeinen Gesetze, nach welchen sich die Wirbelströme bilden, noch nicht genügend erforscht, um sich über deren Grösse genaue Rechenschaft ablegen zu können, einen ungefähren Begriff von deren Wesen jedoch erhalten wir an Hand der Fig. 36. Nehmen wir an, die massive Platte P sei einer variablen Induktion ausgesetzt. Wir können uns nun die Platten in eine Anzahl konzentrischer Ringe zerschnitten denken, in welchen, wie früher gezeigt wurde, Ströme von bestimmter Richtung erzeugt werden. Ihre Grösse hängt einerseits von der Anzahl Linien ab, welche geschnitten werden und die proportional dem Quadrate des Durchmessers ist, und ist umgekehrt proportional dem Widerstande, d. h. dem Durchmesser; folglich nehmen die Wirbelströme gegen das Centrum hin ab.

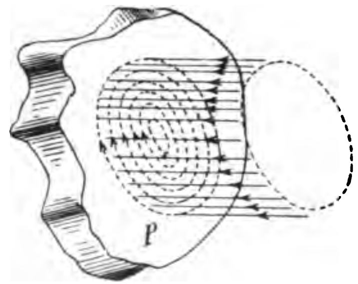


Fig. 36.

Das Auftreten der Foucaultströme im Eisen einer Armatur lässt sich auf die nämlichen Ursachen zurückführen. Zur besseren Erklärung denken wir uns die Armatur als ein Büschel von rund um die Axe und parallel mit derselben gelegten Drähten, die von einander isoliert sind. Es wird daher bei einer Rotation in jedem dieser Drähte eine EMK erzeugt, deren Grösse vom radialen Abstande, bezw. der totalen Zahl Kraftlinien, welche um den Draht kreisen, abhängt. In a herrscht die grösste Potentialdifferenz, in b ist sie gleich Null, weil hier überhaupt keine Kraftlinienänderung stattfindet.

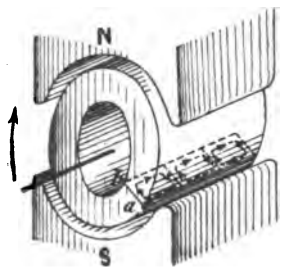


Fig. 37.

Diese Erscheinung ist auch noch dann vorhanden, wenn die Armatur als massiver Eisenklotz gedacht wird, und die Folge davon ist eine Cirkulation von Induktionsströmen in axialem Sinn. Um

dieselbe zu verhüten, setzt man die Armatur aus Blechscheiben zusammen, die entweder an der Oberfläche oxidiert sind, oder durch Papier isoliert werden (gewöhnliche Dicke 0,5 m/m).

Die früher öfters angewandte Methode, den Armaturkörper durch Aufwickeln von Eisendraht herzustellen, ist in neuerer Zeit fast gänzlich aufgegeben worden, weil der magnetische Widerstand zu gross ist.

J. A. Fleming gibt für die beiden Konstruktionen folgende Formeln an, um die Foucaultströme zu berechnen:

bei Anwendung von Drähten:

$$\text{27.} \qquad \text{Wattverlust} = \frac{(d \,.\, \omega \,.\, B_{max})^2 \,.\, V}{4 \,.\, 10^{12}},$$

für Blechscheiben:

$$\text{28.} \qquad \text{Wattverlust} = \frac{16\,(a \,.\, \omega \,.\, B_{max})^2 \,.\, V}{10^{12}}.$$

d = Durchmesser des Drahtes in c/m;
ω = Periodenzahl per Sekunde;
a = Dicke der Blechscheiben in c/m;
V = Eiseninhalt in c/m³.

Die Gleichung 28 hat nur Gültigkeit für $a <= 0,1$.

Beispiel 1. Wie gross ist der Wattverlust durch Foucaultströme in einer 2poligen Maschine von 10 Kilowatt und 1000 Touren, für

$$V = 9000;\ B_{max} = 12000;\ a = 0,05;\ \omega = 16,7?$$

$$\text{Wattverlust} = \frac{16\,(0,05 \,.\, 16,7 \,.\, 12000)^2 \,.\, 9000}{10^{12}} = 14,4 = 0,14\ \%.$$

Beispiel 2. Man berechne den Wattverlust durch Wirbelströme für eine 6polige Maschine von nachstehenden Daten:

Leistung = 26,7 Kilowatt;
Touren = 720;
$B_{max} = 10000$;
$a = 0,05$;
$V = 23000$;
$\omega = 36$.

$$\text{Wattverlust} = \frac{16\,(0,05 \,.\, 36 \,.\, 10000)^2 \,.\, 23000}{10^{12}} = 120 = 0,43\ \%.$$

Wir sehen aus den beiden Beispielen, dass die Berechnung der Wirbelströme nur für Maschinen mit grosser Periodenzahl notwendig ist, für 2polige Maschinen kann sie dagegen ohne weiteres vernachlässigt werden.

4. Lagerreibung.

Die auf die Lager wirkenden Zugkräfte setzen sich zusammen aus dem Gewichte G und dem Riemenzug Z. Letzterer wirkt in der Regel horizontal, der resultierende Lagerdruck ist folglich

$$P = \sqrt{G^2 + Z^2}.$$

Da es für manche Fälle von Vorteil ist, den ungefähren Reibungsverlust zum voraus bestimmen zu können, ohne genötigt zu sein, das Armaturgewicht vorher auszurechnen, so wollen wir es versuchen, für diese Grösse allgemeinere Formeln aufzustellen.

Glücklicherweise variieren die Gewichte von Dynamomaschinen verschiedener Systeme für die nämliche specifische Leistung W_s (Kilowatt bei 1000 Touren) nicht so sehr von einander, als dass sie nicht bis zu einem gewissen Grade durch eine allgemeine Formel ausgedrückt werden könnten.

Im Mittel beträgt das Gewicht der kompletten Maschine

29. $$G = 175 \, . \, W_s^{2/3} \text{*)}.$$

Die max. Abweichungen betragen für kleine Maschinen höchstens 30—35 %, bei grossen gewöhnlich weniger.

Hievon entfallen ca. 25 % auf die Armatur.

Es soll nun W_s die specifische Leistung,
W die Leistung bei n Touren,
v die Riemengeschwindigkeit bedeuten, dann ist

30. Gewicht der Armatur $G = 44 \, . \, W_s^{2/3} = 4400 \left(\frac{W}{n}\right)^{2/3}$

*) Bei Motoren ist für W_s $\frac{736 \times HP}{n}$ zu setzen.

31. **Maxim. Riemenzug** $Z = \dfrac{3}{0{,}89} \cdot \dfrac{W \cdot 1000}{9{,}81 \cdot v} = 345 \cdot \dfrac{W}{v}$

bei einem mittleren Nutzeffekt von 89 %.

Es sind nun 2 Fälle zu berücksichtigen:

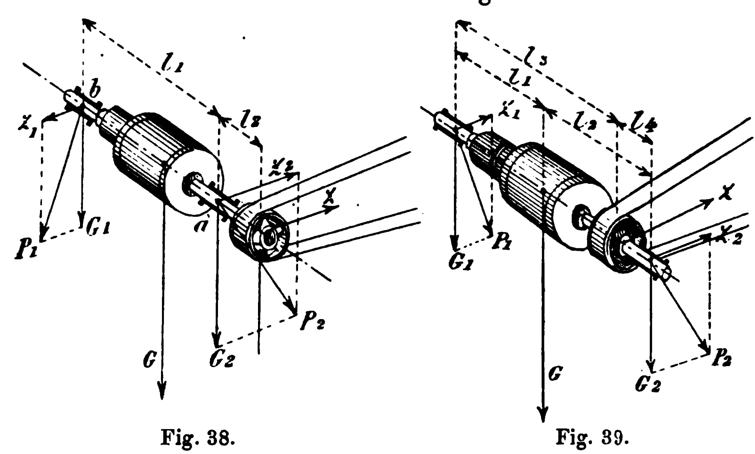


Fig. 38. Fig. 39.

a) **Riemenscheibe fliegend, Fig. 38,**

b) **Riemenscheibe und Armatur zwischen 2 Lagern, Fig. 39.**

Ein dritter Fall ist der mit 3 Lagern, doch wird man hier nicht zu grosse Fehler begehen, wenn man der Rechnung den Fall *b* **zu Grunde legt. Im ersten Falle kann angenähert angenommen werden, dass sich das Armaturgewicht gleichmässig auf die beiden Lager verteile.**

Für die gewöhnlichen Ausführungen ist dann

a) **Riemenscheibe fliegend:**

32. **Lagerdruck in** a =

$$\sqrt{\left(\frac{G}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1} \cdot Z\right)^2} = \sqrt{4850000 \left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 190000 \left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Lagerdruck in b =

$$\sqrt{\left(\frac{G}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{l_1} \cdot Z\right)^2} = \sqrt{4850000 \left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 8400 \left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Für kleinere Maschinen bis zu 10 Kilowatt gibt die Formel etwa 15 % zu grosse Lagerdrücke.

b) Riemenscheibe zwischen 2 Lagern:

33. Lagerdruck in a =

$$\sqrt{\left(G\cdot\frac{l_2}{l_1+l_2}\right)^2+\left(\frac{l_3}{l_3+l_4}\cdot Z\right)^2}=\sqrt{3550000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3}+82000\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Lagerdruck in b =

$$\sqrt{\left(G\cdot\frac{l_1}{l_1+l_2}\right)^2+\left(\frac{l_4}{l_3+l_4}\cdot Z\right)^2}=\sqrt{6300000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3}+3300\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

(Vergleiche übrigens das Armaturgewicht in Kap. VIII.)

Aus dem Lagerdruck P, der Umfangsgeschwindigkeit v_1, der Welle in den Lagern und dem Reibungskoefficienten $f = 0{,}05$—$0{,}1$, berechnet sich dann der Reibungsverlust

34. Reibungsverlust $= P\,.\,v_1\,.\,f\ \ Kgm = 9{,}81\,.\,P\,.\,v_1 f$ Watt.

Beispiel. Wie gross ist der voraussichtliche Reibungsverlust einer Maschine von 40 Kilowatt und 700 Touren mit fliegender Riemenscheibe?

Riemengeschwindigkeit	$v = 16{,}5$ m/s;
Wellengeschwindigkeit	in $a = 2{,}75$ m/s;
„	in $b = 2{,}40$ m/s;
Reibungkoefficient	$= 0{,}07$.

$$\text{Lagerdruck in } a = \sqrt{4850000\left(\frac{40}{700}\right)^{4/3} + 190000\left(\frac{40}{16{,}5}\right)^2} = 1100 \text{ kg}.$$

$$\text{do. in } b = \sqrt{4850000\left(\frac{40}{700}\right)^{4/3} + 8400\left(\frac{40}{16{,}5}\right)^2} = 400 \text{ kg}.$$

Wattverlust $= 9{,}81\,.\,0{,}07\,(1100\,.\,2{,}75 + 400\,.\,2{,}4) = 2400$ Watt $= 6$ %.

5. Nutzeffekt, Erwärmung.

Es seien

W die nützlichen Watt, bei Motoren = $736 \times$ nützliche PS;

Σw die Summe sämtlicher Verluste, und zwar:

w_a = Wattverlust im Kupfer der Armatur,

w_h = „ durch Hysteresis,

w_f = „ „ Foucaultströme,

w_r = Reibungsverlust in Watt ausgedrückt,
w_m = Wattverlust in den Magneten = Magnetisierungsstrom^2 × Widerstand der Magnetwicklung;
ζ der Nutzeffekt,

so ist

$$\zeta = \frac{W}{W + \Sigma w} \quad \text{oder}$$

35. $$\zeta = \frac{W}{W + w_a + w_k + w_f + w_r + w_m}.$$

Jeder Verlust äussert sich durch Wärmeentwicklung, d. h. durch eine entsprechende Temperaturzunahme der von diesem Verluste betroffenen Maschinenteile. Die Leistung einer Gleichstrommaschine ist daher, abgesehen von mechanischen Bedingnissen, an die Wärmeausstrahlungsfähigkeit oder mit andern Worten an die Oberfläche der Maschine gebunden.

Es ist leicht, aus Gleichung 35 den max. möglichen Nutzeffekt einer Maschine zu bestimmen. Wir brauchen nur W durch JE und w_a durch J^2R zu ersetzen (R = totaler Armaturwiderstand); ferner sei $w_k + w_f + w_r + w_m = w_\chi$ als konstant angenommen. Differenzieren wir diese Gleichung, so folgt

$$\zeta = \text{Maximum für } w_a = w_\chi \text{ und}$$

der dem max. Nutzeffekt entsprechende Strom

$$J = \sqrt{\frac{w_\chi}{R}}.$$

Allgemein richtige Formeln über die Temperaturzunahme von Maschinen lassen sich leider keine aufstellen, wir begnügen uns daher mit den längst bekannten Formeln von W. B. Esson (siehe Journal of the Institution of Electr. Eng. vol. XIX), welche nicht allzuweit vom Ziele schiessen:

a) Für Armaturen.

36. $$\text{Erwärmung in C}^0 = \frac{225 \times \text{Wattverlust in der Armatur}}{\text{Abkühlungsfläche in } \%_m^2.}$$

b) Für Magnete.

37. $$\text{Erwärmung in C}^0 = \frac{335 \times \text{Wattverlust pro Spule}}{\text{Oberfläche einer Spule in } \%_m^2.}$$

Hiebei ist zu bemerken, dass bei Armaturen im allgemeinen nur die äussern Mantel- und die Seitenflächen zählen, bei kleinern Armaturen sogar nur die eine der letztern. Hat die Luft auch im innern der Armatur Zutritt und ist der Durchmesser nicht zu klein, so kann noch ungefähr $^1/_3$ der innern Oberfläche dazu gerechnet werden.

Für die Magnete zählt die innere gegen den Eisenkern gerichtete Fläche nicht mehr, wohl aber die Endflächen.

Beispiel. Der Durchmesser der fertigen Armatur einer 10 Kilowatt-Maschine sei gleich 24 $^{c}/_{m}$, Länge = ca. 40 $^{c}/_{m}$ (über die Wicklung gemessen); ferner beträgt der Durchmesser der gegen das Pulley gerichteten Stirnfläche ca. 16 $^{c}/_{m}$.

$$\text{Abkühlungsfläche} = 24 \cdot \pi \cdot 40 + \frac{16\,\pi^2}{4} = 3200\ ^{c}/_{m}{}^2.$$

Verlust im Kupfer	=	*2600* Watt.
„ durch Hysteresis	=	*300* „
	Total	*2900* Watt.

$$\text{Erwärmung nach Esson} = \frac{225 \cdot 2900}{3200} = 20^0\ \text{C.}$$ über die Temperatur des Maschinenlokales; bei 20⁰ C. im Maschinenhause nimmt die Armatur folglich ca. 40⁰ C. an.

Die Formel 36 ist insofern nicht ganz korrekt, als der Armaturgeschwindigkeit nicht genügende Rechnung getragen ist. Es ist auch beizufügen, dass die Erwärmung im allgemeinen vielleicht auch etwas kleiner ist, als die Formel angibt.

Nach A. H. und C. E. Timmermann (Silv. P. Thompson, Dynamo-Electric Machinery, 5th Edition) beträgt die Anzahl Watt, welche per engl. Zoll Abkühlungsfläche ausgestrahlt werden kann:

bei 0 $^{m}/$	Geschwindigkeit	0,01	Watt per C⁰
„ 5 $^{m}/$	„	0,018	„ „ „
„ 15 $^{m}/$	„	0,022	„ „ „

oder auf $^{c}/_{m}{}^2$ bezogen, liesse sich dies angenähert durch die Formel ausdrücken:

$$38.\quad \text{Erwärmung in der Armatur} = \frac{645 \cdot \text{Wattverlust}}{\text{Oberfläche}\,(1 + 0{,}3\sqrt{v})}\ C^0.$$

v = Umfangsgeschwindigkeit in $^{m}/$ per Sekunde.

Man betrachtet im allgemeinen eine Temperaturerhöhung von 35—40° C. gegenüber der Temperatur im Maschinenhaus als Normalie. Einige Konstrukteure gehen noch weiter, doch ist davon abzuraten, weil die Drahtisolation mit der Zeit spröde wird und nach einigen Jahren notwendiger Weise zu Grunde gehen muss.

Bei guten Maschinen sollten daher ca.

13—16 cm^2 Abkühlungsfläche pro Watt in den Magneten und
8,5—10 cm^2 „ „ „ „ der Armatur vorgesehen worden.

Eine Ausnahme hievon bilden Maschinen, welche für heisse Gegenden oder Schiffe bestimmt sind, wo die Temperatur des Lokales bis auf 40° C. steigen kann.

Besonders strenge ist in dieser Beziehung die englische Admiralität, welche eine maximale Temperaturerhöhung von 17° C. gestattet, was vielleicht etwas gar zu niedrig ist.

C. Umrechnung einer Armatur für andere Spannungen.

Die Gleichung 5

$$E = \frac{n \cdot \Phi \cdot N}{60 \cdot 10^8} \cdot \frac{p}{p^1}$$

zeigt, dass die Leistung einer Maschine durch Vergrösserung der Tourenzahl beliebig gesteigert werden kann. Die Maximalleistung ist daher an die Ausstrahlungsfähigkeit und die Temperaturzunahme gebunden, welche nach Gl. 36—38 ausgerechnet werden kann. Wir setzen hiebei voraus, dass die magnetischen Eigenschaften derart seien, dass die Maschine auch bei Überbelastung funkenlos läuft. Eine weitere Bedingung ist nun, dass die Umfangsgeschwindigkeit einen bestimmten Wert (25—30 m/s) nicht überschreitet. Zu bemerken ist hiebei, dass amerikanische Fabrikanten (z. B. die Westinghouse Co.) noch grössere Geschwindigkeiten als zulässig erachten.

Wird die Tourenzahl einer Maschine von bestimmter maximaler Leistung, gegeben durch die Abkühlungsfläche, vergrössert, so nimmt die Leistung nicht mehr proportional der Tourenzahl zu, sondern sie bleibt fast konstant oder nimmt sogar infolge der ver-

mehrten Hysteresisverluste um ganz wenig ab; bei Maschinen mit reduzierter Tourenzahl stellt sich im Gegenteil ein kleiner Vorteil heraus. Immerhin kann jedoch die Stärke einer Maschine innerhalb den praktisch in Frage kommenden Grenzen als proportional der Tourenzahl betrachtet werden.

Diese Regel unterleidet nur insofern eine kleine Beschränkung, als sich mit der Art der Wicklung auch häufig der Luftraum zwischen dem Armatureisen und den Polen ändert.

Wird der Luftabstand bei gleichbleibenden Φ für die neue Wicklung grösser, so kann nämlich leicht der Fall eintreten, dass der für die Magnetentwicklung zur Verfügung stehende Wicklungsraum nicht mehr hinreicht, um die nötige Zahl Ampère-Windungen zu unterbringen.

Anmerkung. Bei der Bezeichnung von Maschinentypen wird von den Fabrikanten gewöhnlich in der Weise verfahren, dass man für jeden Maschinentypen einen bestimmten Buchstaben als Kennzeichen annimmt und die Leistung in Watt, *PS* oder Ampère ausgedrückt dahinter setzt.

GD 50 kann z. B. eine Gleichstrommaschine von 50 Kilowatt,
WM 25 einen Wechselstrommotor von *25 PS* bedeuten.

Diese Bezeichnung ist deshalb nicht vorteilhaft, weil sie wegen der Verschiedenheit der Tourenzahl keine direkte Beurteilung der Grösse gestattet. Viel logischer wäre es hiefür, die specifische Leistung, d. h. die Leistung pro 1000 Touren (in Kilowatt) einzusetzen, wodurch die Übersicht und die Wahl eines bestimmten Types für eine abnormale Tourenzahl sehr erleichtert wird. Es mag dies an einem Beispiele gezeigt werden. Die Tabelle der normalen Maschine sei wie folgt:

Nr.	1	2	3	4	5
Kilo-Watt	5	10	16	$24\frac{1}{2}$	33
Touren	1200	1000	800	700	600
Spec. Leistung in *KW* bei 1000 Touren	4	10	20	35	55

Hat man nun für einen bestimmten Zweck eine Maschine von sagen wir *20 KW* und 400 Touren nötig, so entspricht dies $\frac{20 \cdot 1000}{400} = 50\ KW$ spec. Leistung. Wir sehen sofort, dass hiefür der Type von *55 KW* spec. Leistung als nächster zu nehmen ist und zwar wird diese Nummer voraussichtlich auch noch ausreichen, wenn die Spannung z. B. 200—300, statt 100 Volt normal ist.

E, J und n sollen die elektrischen Grössen der vorhandenen Maschinen sein, E_1, J_1 und n_1 diejenigen der umgeänderten.

Aus Gleichung 5 folgt für gleichbleibendes Φ

$$N_1 = N \cdot \frac{E_1}{E} \cdot \frac{n}{n_1}.$$

Wir berechnen nunmehr den Drahtquerschnitt nach Gleichung 21

$$s_1 = \frac{\mathfrak{L} \cdot N \cdot J}{60 \cdot e \cdot 4\, p_1^2} \cdot 1{,}2 \text{ oder}$$

$$d = \frac{1}{12{,}5\, p_1} \sqrt{\frac{\mathfrak{L} \cdot N \cdot J}{e}}.$$

Für die erste approximative Bestimmung des Drahtquerschnittes kann man

39. $$s = \frac{1 \cdot J}{i\, 2\, p_1} \text{ setzen,}$$

in welcher Gleichung i für die Drahtbeanspruchung in Ampère pro $^{m}/_{m}{}^2$ steht; i variiert im allgemeinen zwischen 5 — 2; bis zu Strömen von 1500 Ampère darf mit ziemlich guter Übereinstimmung

40. $$i = 90\, \varepsilon$$

angenommen werden (siehe S. 59).

ε variiert zwischen 0,06—0,02.

Ist die Zahl der Bürstenstifte bei beiden Maschinen die nämliche, so gilt für gleichen prozent. Voltverlust

$$\frac{s_1}{s} = \frac{J_1}{J}.$$

Gewöhnlich erweist sich jedoch in der Folge eine kleine Änderung in der Grösse des Voltverlustes $\varepsilon \cdot E = e$, sowie der totalen Induktion als notwendig, so dass die obige Formel nur als erste Annäherung zu betrachten ist.

Drähte und Drahtisolation. Ausser den runden Drähten sind auch viereckige Drähte und Drahtisolation im Gebrauch, doch empfiehlt sich deren Anwendung nicht, weil sie sehr schwer zu wickeln sind und die Isolation, die, nebenbei bemerkt, bei gleicher Konstruktion etwas mehr aufträgt, leicht leidet. Grössere Arma-

turen werden entweder mit Kupferbarren versehen oder mit Kabeln von beliebigem Querschnitt bewickelt. Um ein gutes Anliegen der Isolation zu sichern, ist es ratsam, auf alle Fälle die Kanten abzurunden. Kann man Kabeln einen Querschnitt, wie Fig. 40 *b* zeigt, geben, so ist dies für die Fabrikation des Kabels sehr angenehm und kostet etwas weniger.

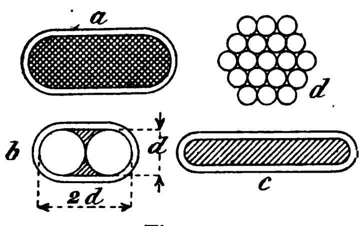


Fig. 40.

Das Kabel wird dann aus zwei runden Kabeln hergestellt und der Zwischenraum mit einzelnen Drähten ausgefüllt. Die Benutzung von Kabeln statt Drähten hängt nicht nur von der leichten Ausführbarkeit der Wicklung ab, sondern sie ist bei glatten Armaturen mit grossen Stromstärken mit Rücksicht auf die Foucaultströme unter Umständen sogar vorgeschrieben.

Kabel haben bei gleichem Durchmesser ca. 25 — 22 % weniger nutzbaren Querschnitt als ein voller Draht. Die Litzenzahl beträgt gewöhnlich 19 oder 37 (vergl. Kabeltab. III am Schlusse des Buches).

Die Dicke der I s o l a t i o n hängt von der Anzahl der Umspinnungen und der Dicke der Umklöpplung ab. Letztere hat den Zweck, die Umspinnung gegen eine Verschiebung zu schützen und ist deshalb nur bei vollen Armaturdrähten oder bei Kabeln notwendig. Über die Dicke von Baumwollumspinnungen mag die nachstehende Tabelle einigen Anhaltspunkt geben:

Dicke des nackten Drahtes *d*	Garn Nr.	Dicke der Isolation *b* in m/m		
		1 × umsponnen	2 × umsponnen	3 × umsponnen
1 m/m	70	0,25	0,50	0,65
	100	0,20	0,40	0,45
5 m/m	70	0,25	0,40	0,55
	100	0,20	0,30	0,35

Eine Umklöpplung hat ungefähr $1^1/_2$ bis 2 fache Dicke einer Umspinnung. Bei Kabeln und 4 eckigen Drähten trägt die Isolation,

wie bereits bemerkt, etwas mehr auf. Die obigen Zahlen sind also demgemäss etwas zu vergrössern.

Beispiel. Die elektrischen Daten einer Maschine von 4000 Ampères, 20 Volt und 220 Touren seien wie folgt:

Armaturdurchmesser	$D = 97,9$
Armaturlänge	$l = 60,0$
Anzahl Drähte	$N = 120$
Anzahl Polpaare	$p = 3$
$\frac{1}{2}$ Zahl Bürstenstifte	$p_1 = 3$
Mittlere Länge einer Armaturwindung	$\mathfrak{L} = 1,6$ m/

Armatur mit Zacken ausgeführt.

Diese Maschine ist für 700 Ampères und 120 Volt bei 250 Touren umzurechnen. Es ist hier einzuschalten, dass die ursprüngliche Maschine so schwach gesättigt war, dass wir ohne Bedenken auf die doppelte Sättigung gehen können.

Wir schreiben demzufolge

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{220}{250} \cdot \frac{120}{20} \cdot 120 = 320.$$

Lassen wir 4 % Spannungsverlust, d. h. 4,8 Volt im heissen Zustande zu, so wird der Drahtquerschnitt

$$s_1 = \frac{320 \cdot 700 \cdot 1,6 \cdot 1,2}{60 \cdot 4,8 \cdot 4 \cdot 9} = 41,5 \text{ m/m}^2.$$

Dies ist ungefähr der Querschnitt eines Kabels von 8,2 m/m Durchmesser nackt oder 8,9 m/m isoliert. Führt man die Wicklung in 2 Lagen aus, so erhält man Nuten von ca. 10 m/m Breite und ca. 20—21 m/m Tiefe. Die Zacken werden etwas tiefer gemacht als dies für die Unterbringung der Drähte notwendig wäre, um die Bandagen vertieft verlegen zu können. Der Durchmesser der fertigen Armatur ist dann gleich dem Eisendurchmesser.

Kontrolle. Der Polbogen der Maschine beträgt 30 c/m. Der Luftabstand 0,6 c/m; die elektromotorische Kraft, d. h. die Bürstenspannung + dem Ohm'schen Verlust + dem Spannungsabfall durch die Armaturreaktion kann zu 130 Volt angenommen werden.

Hieraus ergibt sich

$$B = \frac{130 \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot 3}{320 \cdot 250 \cdot 3} \cdot \frac{1}{60 \cdot 30} = 5400.$$

Ferner nach Gleichung 18:

$$k_{max} = < \frac{20}{4\pi} \cdot \frac{5400 \cdot 0,6}{30} = 173,$$

und aus den Daten der Maschine:

$$k = \frac{320 \cdot 700}{2 \cdot 3 \cdot 979 \cdot \pi} = 122$$

$$\frac{km}{k} = 1{,}42.$$

Luftabstand. Der Luftabstand glatter Armaturen setzt sich wie folgt zusammen:

1. Dicke der Isolation des Eisenkörpers (Papier, Tuch oder dgl.) ca. 1—2 m/m.
2. Höhe der übereinander gelegten Drähte. Zweckmässiger Weise werden die Drähte so übereinander gelegt, dass jeder Draht einer nachfolgenden Lage zwischen 2 Drähte der untern zu liegen kommt. Für N_1 Lagen wird die totale Höhe $= d_1 + (N_1 - 1)\, d_1 \sin. 60$. Gewöhnlich macht man nicht mehr als 2 Lagen, so dass

$$h = 1{,}9\, d_1 \quad \text{wird.}$$

3. Dicke der Bandagen 1,5—2 m/m.
4. Eigentlicher Luftabstand zwischen der fertigen Armatur und den Polen 2—5 m/m.

Für Zackenarmaturen gilt es als Regel,

$\delta \geqq 0{,}5\, u$ zu machen (siehe Fig. 41).

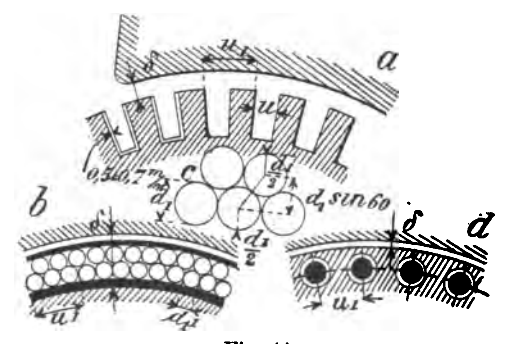


Fig. 41.

D. Vorausberechnung einer neu zu konstruierenden Armatur.

Um bei der Vorausberechnung einer ganz neuen Maschine schnell zum Ziele zu gelangen, sind zwei Rechnungen erforderlich:

1. Approximative Bestimmung der Armaturdimensionen, Durchmesser und Länge,
2. Kontrolle derselben.

Approximative Vorausbestimmung der äussern Armaturdimensionen:

Wir gehen von der allgemeinen Gleichung 5 aus,

$$E = \frac{N \cdot \Phi \cdot n}{60 \cdot 10^8} \cdot \frac{p}{p_1}, \text{ worin}$$

$$N = \frac{k \cdot 2 p_1 D \pi}{J} \text{ und}$$

$$\Phi = \frac{D \pi \beta l B}{2 p}$$

$$E = \frac{k \cdot 2 p_1 D \pi}{J} \cdot \frac{D \pi \beta l B}{2 p} \cdot \frac{n p}{p_1 60 \cdot 10^8}$$

41. $$D = \sqrt{\frac{E J}{n}} \cdot \sqrt{\frac{60 \cdot 10^8}{k \beta B} \cdot \frac{1}{l}}.$$

Für eine erste approximative Bestimmung genügt es nun, folgende Annahmen zu machen:

$k = 100$ für Ringarmaturen,
$= 150$ für Trommelarmaturen,
$B = 5600$
$\beta = 0{,}7$. Die Gleichung 41 erhält dann folgende einfache Gestalt:

42. $$D = 39 \sqrt{\frac{E J}{n} \cdot \frac{1}{l}} \text{ für Ringwicklung,}$$

43. $$D = 32 \sqrt{\frac{E J}{n} \cdot \frac{1}{l}} \text{ für Trommelwicklung,}$$

oder $l = \lambda D$ gesetzt

44. $$D = 11{,}5 \sqrt[3]{\frac{E J}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$ für Ringwicklung,

45. $$D = 10 \sqrt[3]{\frac{E J}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$ für Trommelwicklung.

Diese Formeln stimmen beinahe exakt mit denjenigen von Albion Snell (Journ. of Electr. Eng. vol. XIX) überein.

In wieweit sie den praktischen Ausführungen entsprechen, mag aus nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Nr.	$\frac{E J}{n}$	λ	Berechnet		Ausgeführt		Bemerkung
			D	l	D	l	
			cm	cm	cm	cm	
1	1,92	0,89	13	11,5	18	16	2polige Trommel.
2	10	1,12	20,7	23,2	24	27	2polige Trommel.
3	22,2	0,79	30,4	24	31,6	25	2polige Trommel.
4	57	0,78	41,8	32,6	41	32	4 „ „
5	100	0,67	61	41	60	40	2 „ Ring.
6	178	0,45	73,5	33	80	36	6 „ Trommel.
7	545	0,61	110	67	98	60	6 „ Ring.
8	660	0,48	111	53,5	115	55	4 „ Trommel.
9	2750	0,18	248	45	237	43	24 „ „
10	20000	0,34	390	132	320	110	12 „ „

Die Formeln geben, wie ersichtlich, ganz gute Resultate für Maschinen von ca. 15 Kilowatt an bis zu 400 *KW*, für kleinere Maschinen muss der Durchmesser aus mechanischen Gründen grösser gewählt werden.

Ist der ungefähre Durchmesser und die Länge bezw. das Verhältnis $\lambda = \frac{l}{D}$ bekannt, so bestimmt man den Drahtquerschnitt, und zwar kann für eine erste Annäherungsrechnung mit Vorteil folgende Methode benutzt werden:

Die ungefähre Länge $\mathfrak{L}$ einer Windung (bei Trommeln diejenige Länge, welche auf einen Draht am Umfang nebst dessen Verbindungen auf einer Stirnfläche entfällt

46. $\mathfrak{L}$ in $^{m}/ = 0{,}019\ (0{,}45\, D + l) = 0{,}019\, D\ (0{,}45 + \lambda)$

wenn D und l in $^{c}/_{m}$ gegeben sind.

Nach Gleichung 21 und 39 ist ferner

$$s = \frac{J}{2\, p_1\, .\, i} = \frac{\mathfrak{L}\, .\, N\, .\, J}{200\, .\, p_1^2\, .\, \varepsilon E}.$$

Setzt man in dieser Gleichung den Wert von N aus Gleichung 5 ein, wobei wir Φ durch $\frac{D\pi}{2p}\ \beta\, l\, B$ ersetzen, so folgt

47. $$i = \frac{1{,}38\ \beta\, B\, .\, \lambda\, .\, D\, .\, n\, \varepsilon}{10^6\, (0{,}45 + \lambda)}.$$

Diese Formel lässt sich noch für Maschinen, deren Tourenzahl nicht allzusehr von den normalen abweichen, bedeutend vereinfachen. $\frac{\lambda\, D\, n}{(0{,}45 + \lambda)}$ ist nämlich eine beinahe konstante Grösse und gleich 17500 im Mittel; bei langsam gehenden Dynamos und kleinem λ ist diese Zahl um 20—30 % kleiner anzunehmen, bei grössern Maschinen mit langer Armatur um ca. 20—30 % zu erhöhen.

Nimmt man ferner $\beta = 0{,}7$ und
$B = 5600$, so wird
$i = 90\, .\, \varepsilon$ (siehe Gl. 40).

48. $$s = \frac{J}{p_1\, .\, 180\, .\, \varepsilon}.$$

Genauere Bestimmung. Man zeichne nun einen kleinen Teil des Armaturumfanges in Naturgrösse oder vergrössertem Massstabe auf (siehe Fig. 41) und berechne die auf eine bestimmte Länge u_1 entfallende Zahl Drähte N'.

$$N = \frac{D\pi}{u_1}\, .\, N'.$$

Bei Zackenarmaturen wählt man gewöhnlich die Anzahl Nuten gleich der doppelten oder einfachen Anzahl Collectorlamellen.

Um ein Umkehren der Pole zu verhindern, muss der Gleichung 19 Genüge geleistet werden, d. h.

$$N < 6{,}37 \, . \, \frac{B_l \, . \, \delta \, . \, p \, . \, p_1}{J \, \beta} > \frac{D \pi}{u_1} \, . \, N'.$$

Bei dieser Gelegenheit unterlasse man es auch nicht, die Sättigung in den Zacken zu kontrollieren. Dieselbe darf nicht über 16000—18000 bei 2poligen Maschinen sein. Bei mehrpoligen bleibe man womöglich unter 12—15000.

Durch entsprechende Modifikation von B, δ, β, N' und m_1, event. verbunden mit einer kleinen Änderung der Querschnittsform des Drahtes, wird es stets möglich sein, diese Bedingungen zu erfüllen.

Substituiert man noch den Wert von Φ und $N = \frac{D \pi}{u_1} \, . \, N'$ in Gleichung 5, so kann nunmehr mit ziemlicher Genauigkeit der Armaturdurchmesser nach der Formel

$$49. \qquad D = \sqrt{\frac{E \, p_1 \, . \, u_1}{n \, N' \, \beta \, l} \, . \, \frac{120 \, . \, 10^8}{\pi^2 \, . \, B}}$$

berechnet werden. — Für E setze EMK.

Kontrolle. Selbstverständlich ist am Schlusse dieses eine nachträgliche Kontrolle unerlässlich. Dieselbe betrifft in erster Linie den Drahtquerschnitt, der auf Grund der aus der Zeichnung entnommenen wirklichen Windungslänge genau festzustellen ist. Ferner hat man sich durch Aufzeichnen der Wicklung zu überzeugen, dass dieselbe auf den Stirnflächen u. s. w. Platz findet.

Der innere Armaturdurchmesser hängt bei Trommeln lediglich von Φ ab, bei Grammeringen dagegen muss vor allem aus die Placierung der Drähte berücksichtigt werden. Es hat dies zur Folge, dass besonders kleinere Ring-Maschinen einen verhältnismässig grossen Armaturdurchmesser erhalten.

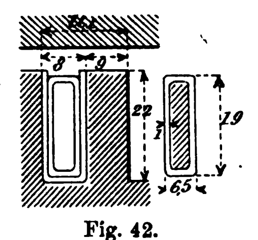


Fig. 42.

Beispiel 1. Zu berechnen die Armatur einer 4poligen Trommelmaschine für 100 *KW* (125 Volt, 800 Amp.) bei 400 Touren.

$p_1 = 2;\ \lambda = 0,6;\ \varepsilon = 0,03$ (3% Verlust); $\beta = 0,7$.

Nach Gleichung 45

$$D = 10\sqrt[3]{\frac{100000}{400} \cdot \frac{1}{0,6}} = 75\ ^c/_m;$$

$$l = 0,6 \cdot 75 = 45\ ^c/_m.$$

Nach Gleichung 48

$$s = \frac{J}{p_1 \cdot 180 \cdot \varepsilon} = \frac{800}{2 \cdot 180 \cdot 0,03} = 74\ ^m/_{m}{}^2 \text{ (siehe Fig. 42).}$$

Ferner (Gleichung 19)

$$N = \frac{D\pi \cdot N'}{u_1} < 6,37 \cdot \frac{B\delta \cdot p_1 p}{J\beta} \text{ oder}$$

$$\frac{75 \cdot \pi \cdot 1}{1,7} < \frac{6,37 \cdot B \cdot \delta \cdot 2 \cdot 2}{800 \cdot 0,7}.$$

Würde man $B = 6000$, $\delta = 0,6\ ^c/_m$ machen, so erhält man
auf der linken Seite *138*,
auf der rechten Seite *164*, daher

$$\frac{k_m}{k} = 1,19 \text{ und nach}$$

Gleichung 49

$$D = \sqrt{\frac{132 \cdot 2 \cdot 1,7}{1 \cdot 0,7 \cdot 45 \cdot 400} \cdot \frac{120 \cdot 10^8}{\pi^2 \cdot 6000}} = 84\ ^c/_m.$$

Der aus Formel 45 berechnete Armaturdurchmesser war folglich etwas zu klein.

Für diesen Durchmesser ist $\frac{k_m}{k} = 1,06$.

Man erkennt daraus deutlich, dass die Anwendung von Zackenarmaturen durch die Leistung der Maschine begrenzt ist und von der Zahl der Pole abhängt.

Um nämlich eine Umkehrung der Magnetpole durch die Armaturreaktion zu verhüten, sind wir jetzt schon genötigt, den Luftabstand sehr gross zu nehmen. Dadurch geht aber der Vorteil der Zacken, welche durch eine Verringerung der Luftdistanz eine Verringerung der Ampèrewindungen auf den Magneten bezweckt, verloren.

Die nämliche Maschine könnte fast ebensogut mit glatter Armatur bei etwelcher Vergrösserung der Polschuhe ausgeführt werden.

Um also den Vorteil der Zacken nicht zu verlieren, ist es am vorteilhaftesten, diese Maschine 6polig auszuführen.

Beispiel 2. Umrechnung der Maschine von Beispiel 1 für 6 Pole und 6 Bürsten.

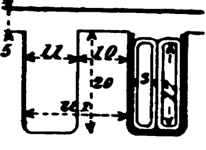


Fig. 43.

Die Armaturlänge von 45 $^{m}/_{m}$ sei beibehalten.

$$s = \frac{800}{3 \cdot 180 \cdot 0{,}03} = \text{rund } 50 \; ^{m}/_{m}{}^{2}.$$

$$\beta = 0{,}7$$

$$N = \frac{84 \cdot \pi \cdot 2}{2{,}1} < 6{,}37 \; \frac{B \cdot \delta \cdot 3 \cdot 3}{800 \cdot 0{,}7}.$$

Angenommen $B = 5500$
$\delta = 0{,}5$

$$D = \sqrt{\frac{132 \cdot 3 \cdot 2{,}1}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 45 \cdot 400} \cdot \frac{120 \cdot 10^{8}}{\pi^{2} \cdot 5500}} = 85 \; ^{c}/_{m}.$$

Für diesen Durchmesser ist $\frac{k_m}{k} = 1{,}1.$

Wir können dadurch, ganz abgesehen von den sonstigen Vorteilen der 6poligen Maschinen (geringeres Gewicht), an den für die Luft benötigten Ampère-Windungen ca. 24 % sparen.

Bestimmung des innern Armaturdurchmessers.

Der innere Armaturdurchmesser wird dadurch gefunden, dass man, nachdem Φ aus den definitiven Dimensionen und der Bewicklung herausgerechnet wurde, versuchsweise verschiedene Annahmen für die Sättigung B_a im Armatureisen macht und auf bekannte Weise (Gleichung 26) den entsprechenden Wattverlust durch Hysteresis bestimmt.

Annäherungsweise kann z. B. angenommen werden:

Für 2polige	Maschinen	$B_a =$	$14000—16000,$
„ 4 „	„	$B_a =$	$12000—14000,$
„ 6 „	„	$B_a =$	$9000—13000.$

Es mag hier auch beiläufig erwähnt werden, dass man bei Zackenarmaturen gewöhnlich nur den zwischen dem Fusskreis der Zacken und dem innern Durchmesser enthaltenen Querschnitt als leitend betrachtet. Wenn daher in dem Nachstehenden von

$$\tau = \frac{D_1}{D'} = \frac{\text{Innerem Durchmesser}}{\text{Aeusseren Durchmesser}}$$

die Rede ist, so ist unter D' stets der Durchmesser des Fusskreises verstanden.

Die direkte Berechnung von D_1 ist zwar ebenfalls nicht sehr einfach, sie führt aber mit Benutzung der am Schlusse des Buches enthaltenen Tabellen schneller zum Ziele.

Substituiert man in Gleichung 26 die Werte von

$$B = \frac{\Phi}{D'^2\,(1-\tau)\;0{,}9\;\lambda}$$

$$\eta = 0{,}003 \text{ und}$$

$$V = \frac{D'^3\pi}{4}\,(1-\tau^2)\;\lambda\;.\;0{,}9,$$

so erhält man die Formel

$$50.\quad \frac{(1-\tau)^{0,6}}{1+\tau} = \frac{2{,}5}{10^{10}}\cdot\frac{\Phi^{1,6}}{D'^{0,2}}\cdot\frac{1}{\lambda^{0,6}}\cdot\frac{\omega}{w_k} = m.$$

Man rechnet nun die rechte Seite dieser Gleichung aus, wobei die Tabelle VII benutzt werden kann und sucht für den so erhaltenen Wert von m in Tabelle VIII den Wert von τ auf. Ziemlich angenähert ist $\tau = 1 - m$.

Beispiel. Wie gross ist für die im vorigen Beispiel behandelte 6polige Maschine der innere Durchmesser zu machen, wenn der Wattverlust 1200 (1,2 %) betragen soll?

$$\Phi = \frac{132\;.\;60\;.\;10^8}{\frac{400\;.\;85\;.\;\pi\;.\;2}{2{,}1}} = 7800000.$$

$$D' = 85 - 4 = 81.$$

$$\lambda = \frac{45}{85-4} = 0{,}55.$$

Num. $1{,}6$ log. $7800000 = 10{,}65\;.\;10^{10}$.

Num. $0{,}2$ log. $81 = 2{,}41$.

$\lambda^{0,6}$ (nach Tab. VIII) $= 0{,}697$.

$$\omega = \frac{400\;.\;3}{60} = 20.$$

$$m = \frac{2{,}5}{10^{10}}\cdot\frac{10{,}65\;.\;10^{10}}{2{,}41}\cdot\frac{1}{0{,}697}\cdot\frac{20}{1200} = 0{,}264.$$

Die Tabelle gibt hiefür $\tau = 0{,}73$ an.

Wir sehen, $\tau = 1 - m = 1 - 0{,}264$ ist gleich $0{,}736$, stimmt also ziemlich mit der Tabelle überein.

Wir berechnen hieraus

$$D_1 = 0{,}73 \,.\, 81 = 59 \text{ \%m}.$$

Bezeichnet man mit τ_1 das Verhältnis des innern Armaturdurchmessers D_1 zum äussern D über den Zacken gemessen, so finden sich ungefähr folgende Ausführungen vor:

Zahl der Pole	τ_1
2	0,3 —0,4
4	0,6 —0,65
6	0,65—0,7
8	0,75—0,8
10	0,78—0,83
12	0,80—0,85
24	0,9

Diese Zahlen sind ausgeführten Maschinen von 2—2000 HP entnommen und zwar beziehen sich die grösseren τ_1 auf grössere Durchmesser.

Im vorigen Beispiele einer 6 poligen Maschine war
$D = 85$ %m; $D_1 = 59$

$\frac{D_1}{D} = \frac{59}{85} =$ rund $0{,}7$; die Übereinstimmung mit der Tabelle ist also eine ziemlich gute.

Zum Schlusse folgt noch eine Tabelle ausgeführter Armaturen der verschiedensten Fabrikate. Dieselbe hat nicht etwa den Zweck, als Vorlage für die Konstruktion von Dynamos benutzt zu werden. Obwohl ein grosser Teil dieser Maschinen entschieden gut funktionieren mag, wofür schon der Name der Fabrikanten eine gewisse Garantie bietet, so dürften sich zweifelsohne darunter auch Maschinen vorfinden, welche verbesserungsfähig sind. Die Tabelle soll daher auch lediglich als Hülfsmittel zur schnellen Bestimmung von ungefähren Dimensionen und zur Vergleichung dienen. Wer jedoch zu berechnen versteht, wird daraus noch verschiedene andere interessante Schlüsse ziehen können.

Tabelle ausgeführter Armaturen verschiedener Systeme.

№	Spec. Leistung KW	Normal-Leistung	Volt	Touren	p	p_1	Armatur D cm	Armatur l cm	Armatur N	Armatur Draht	Commutator N_2	Commutator Länge cm	δ cm	Φ	Bemerkungen
1	0,42	1 PS	110	1750	1	1	13,3	13,3	768	—	24	—	—	489000	Sprague (Manchestertype).
2	0,75	1,5 KW	100	2000	1	1	15	15,6	200	1,8	40	4	0,14	1570000	Alter Type Oerlikon (Manchestertype).
3	2,4	5 PS	110	1550	1	1	20,9	20,4	348	—	58	—	—	1228000	Sprague.
4	4,16	5 KW	110	1200	1	1	20	20	228	2,5	38	8	—	2560000	Elekt. Aktienges. vorm. Lahmeyer.
5	5,35	7,5 „	100	1400	1	1	27,6	28	165	3,8	55	6	0,175	2800000	Alter Type Oerlikon.
6	5,4	10 PS	220	1360	1	1	23,5	23,4	576	—	48	—	—	1800000	Sprague.
7	11	20 „	220	1350	1	1	29,6	29	320	—	80	—	—	2974000	„
8	15,6	14 KW	125	900	1	1	30	26	180	4	45	15 k	0,5	5000000	J. Farcot.
9	25	20 „	100	800	1	1	42	42	144	19 Drähte à 1,6	72	13	0,10	5700000	Alter Type Oerlikon.
10	27	21 „	105	750	1	1	28,2	19	120	30 m/m²	60	—	1,05	7153000	Gisb. Kapp.
11	38	35 PS	440	675	1	1	38,4	36,2	464	—	58	—	—	8517000	Sprague.
12	57	40 KW	125	700	2	1	41	32	122	3 × 18	61	16,4	0,6	4750000	Oerlikon.
13	63	30 PS	500	350	2	1	29,5	38	760	No. 11 B u. S	95	7,5	0,555	5200000	Westinghouse Co. (Trammotor).
14	66,6	40 KW	100	600	1	1	51,4	40	80	9,2	40	21	—	13800000	Alter Type Oerlikon.
15	83	50 „	125	600	2	2	56	36	224	2 × 16	112	—	0,75	6000000	J. Farcot.
16	83,4	50 „	125	600	2	2	58	27	210	—	105	14,5	—	6400000	General Electr. Co.
17	100	60 „	110	600	2	2	50	38	160	6 × 6	80	18,5	—	7500000	Schuckert.
18	114	75 PS	440	675	1	1	50	47	38,8	—	97	—	—	13430000	Sprague.
19	120	60 KW	120	500	1	1	62,2	40	140	22 × 4	70	22	0,5	11000000	Alter Type Oerlikon.
20	148	74 „	530	500	3	1	80	33	400	1 × 25	200	12	—	5700000	Alioth, Basel.
21	160	72 „	125	450	2	2	63	44	176	3 × 18	88	18	0,8	10000000	Oerlikon.
22	330	66 „	200	110	2	2	105	31	516	—	516	34	—	22600000	Siemens & Halske.
23	666	200 „	530	300	2	2	115	55	488	1,6 × 18	244	23	1,0	23400000	Oerlikon.
24	900	360 „	600	400	2	2	122	63,5	360	—	180	38	—	27000000	General Electr. Co.
25	2740	410 „	55	150	12	12	237	43	432	19 Drähte à 2,8	216	35	2,45	5600000	Oerlikon.
26	20000	1500 „	550	75	6	6	320	ca. 110	1392	6,35 × 19	696	50,4	0,635	35000000	General Electr. Co.

III. Berechnung der Magnete.

A. Charakteristische Eigenschaften der verschiedenen Magnetschaltungen.

Das einfachste Mittel, um über die Vorgänge in einer Dynamo eine leichte Übersicht zu gewinnen, besteht darin, dass wir ihre **Charakteristik** aufzeichnen, ein graphisches Verfahren, das zuerst von Faraday angewendet wurde und nachher allgemeine Verbreitung fand.

Überhaupt sollte man niemals versäumen, alle Versuchsresultate graphisch aufzuzeichnen, weil es nur dadurch möglich ist, die Richtigkeit der Versuchsdaten zu kontrollieren, und die unvermeidlichen Beobachtungsfehler von den zuverlässigen Angaben auszuscheiden. Man benützt hiezu das gewöhnliche Koordinatensystem; je nach den Grössen, die mit einander verglichen werden sollen, — Erregung mit Spannung, Spannung mit Tourenzahl u. s. w. — trägt man die Spannungen als Ordinaten, die entsprechenden Ampère-Windungen (oder auch bloss Ampère) resp. die Tourenzahlen als Abscissen auf.

Wenn auch unter Charakteristik im engern Sinne nur diejenigen Kurven gemeint sind, welche die den verschiedenen Magnetwicklungsarten eigentümlichen Erscheinungen charakterisieren, z. B. jene, welche erhalten werden, wenn man Armaturstromstärke mit *EMK* vergleicht, so wird diese Bezeichnung auch häufig auf die Kurven im allgemeinen übertragen.

Unter solchen ist weitaus die wichtigste jene, welche sich aus einer Vergleichung von magneto-motorischer Kraft ($\mathfrak{J}m$) mit Spannung ergibt. Man kann sie Magnetisierungskurve nennen*).

*) Für Serienmaschinen ist sie auch Charakteristik.

Sie ist deshalb von Bedeutung, weil sich aus ihr jederzeit mit Leichtigkeit die eigentliche Charakteristik herauskonstruieren lässt.

Statt mit den Ordinaten die externen oder internen Spannungen zu bezeichnen, empfiehlt es sich stets, die mittelst Gleichung 5 ausgerechnete totale Induktion Φ zu setzen. Dadurch machen wir uns gleichzeitig von der Tourenzahl, sowie der Drahtzahl auf der Armatur unabhängig, eine Vereinfachung, die uns bei den nachstehenden Berechnungen öfters zu statten kommt.

Fig. 44 stellt eine solche Magnetisierungskurve einer beliebigen separat erregten Maschine mit stromlosem Anker dar; wir ersehen daraus, dass der erste Teil angenähert eine Gerade ist, die sich, in einem gewissen Punkte angekommen, rasch abbiegt, um in eine schwach gegen die Abscissenaxe geneigte Gerade zu verlaufen, d. h. die Kraftlinienzahl nimmt anfänglich ziemlich proportional den erregenden Ampères-Windungen zu, nähert sich aber nachher mehr und mehr einem maximalen Werte. Eine gute Maschine darf weder zu schwach, noch zu stark gesättigt sein. Das erstere ist deshalb schädlich, weil die Spannung dadurch zu wenig stabil wird und bei der geringsten Tourenänderung bedeutende Schwankungen entstehen. Der Nachteil der zu stark gesättigten Maschinen liegt im Preise. Um den Preis nicht zu stark zu erhöhen und anderseits den erst genannten Übelstand zu umgehen, sollte folgende Regel beobachtet werden:

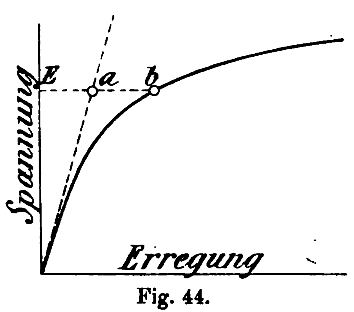


Fig. 44.

Verlängert man den ersten geraden Teil der Chrakteristik (Fig. 44) bis zum Schnittpunkte mit der im Abstande E (EMK) parallel zur Abscissenaxe gezogenen Geraden Eb, so sollte das Stück ab ungefähr gleich Ea sein, wenn immer aber nicht kleiner als Ea sein.

Diese Regel kann, wie sich später zeigen wird, auch folgendermassen ausgedrückt werden: Die totale Zahl Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis sollte mindestens doppelt so gross als diejenigen des doppelten Luftabstandes sein.

Die Serienmaschine.

Wie aus Fig. 45 ersichtlich ist, wird bei der Serienmaschine der gesamte elektrische Strom zur Erregung der Magnete benützt, eine Verminderung des äussern Widerstandes hätte somit nach dem Ohm'schen Gesetz sofort auch eine Vergrösserung der Stromstärke und mit ihr als Wirkung der vermehrten Erregung ein Steigen der Spannung zur Folge. Es ist dies ein Grund, warum derartige Maschinen nicht zur Beleuchtung mit Glühlampen von konstanter Spannung dienen, während sie bei Beleuchtungen mit Bogenlampen und Glühlampen in Serie ausschliesslich Verwendung finden.

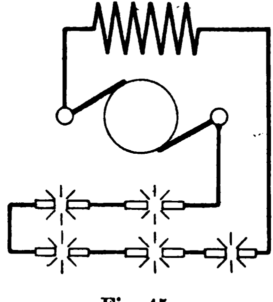


Fig. 45.

Dabei ist aber erforderlich, dass die Maschine eine konstante Stromstärke beibehalte, während sich die Spannung je nach der Zahl der hinter einander geschalteten Lampen — die sich fortwährend ändert — zu richten hat.

Die Methoden, deren man sich zur Erreichung dieses Zweckes bedient, sind verschiedenartig, lassen sich aber im allgemeinen in die nachstehenden 3 Gruppen einteilen:

1. Regulierung der Spannung durch Änderung des magnetischen Feldes.
2. Regulierung durch Verschiebung der Bürsten; erfordert Maschinen mit geringer Armaturreaktion und grosser Zahl Commutatorlamellen, weil sonst die Funkenbildung zu gross wird; sehr gut eignen sich hiefür auch Armaturen mit 2 getrennten Wicklungen (siehe Fig. 14).
3. Regulierung durch Änderung der Tourenzahl.

Vom ökonomischen Standpunkt aus muss der letztern der Vorzug gegeben werden. Ich verweise hierüber auf einen sehr interessanten Vortrag von A. Bernstein, gehalten am 22. Okt. 1889 im Elektrotechn. Verein in Berlin. (Siehe Elektrotechn. Zeitschrift, Nov. 1889.)

A. Bernstein zeigte, dass bei einer Beleuchtungsanlage mit in Serie geschalteten Lampen, die ihren Strom von einer Seriemaschine erhalten, eine konstante Stromstärke dadurch erreicht werden kann, dass man den Dampfmaschinenregulator aushängt. Da nämlich die Dampfmaschine auf konstanten Kolbendruck arbeitet, so tritt beim Ausschalten von Lampen folgende Erscheinung ein: Zunächst nimmt der Widerstand des Stromkreises ab; bei der vorhandenen Spannung würde also die Stromstärke zunehmen, mithin auch die aufzuwendende Energie. Die Dampfmaschine muss also notwendigerweise langsamer laufen und zwar ist ein Gleichgewichtszustand nur für gleiche Stromstärke erreichbar.

Das Hauptverwendungsgebiet der Serienmaschinen ist jedoch weniger die Beleuchtung, als vielmehr die elektrische Kraftübertragung. Wir wollen nun im Nachstehenden untersuchen, wie die magnetischen Verhältnisse zu wählen sind, um die Hauptbedingung der Kraftübertragung, nämlich konstante Tourenzahl der Sekundärmaschine bei verschiedener Belastung, zu erfüllen.

Die interne Spannung der Primärmaschine ist nach früherem durch die Formel gegeben

$$E = \frac{n \Phi N}{60 . 10^8} . \frac{p}{p_1},$$

wofür wir der Einfachheit halber setzen

$$E = c . n . f(Jm).$$

Bedeutet R die Summe der Widerstände in der primären und sekundären Maschine (Armatur und Magnet), sowie in der Leitung, so haben wir in der sekundären Maschine noch eine wirksame Spannung zur Verfügung

$$E_1 = E - JR = c . n . f(Jm) - JR$$

oder, da E_1 auch mit $c_2 \cdot n_1 \cdot f(J n_1)$ geschrieben werden kann, bestimmt sich die Tourenzahl der Sekundär-Dynamo

$$51.\quad n_1 = \frac{E_1}{c_2 \cdot f(J n_1)} = \frac{c \cdot n \cdot f(J n)}{c_2 \cdot f(J n_1)} - \frac{J \cdot W}{c_2 \cdot f(J n_1)}.$$

Der einfachste Fall wäre nun der, wo beide Maschinen in Konstruktion und Bewickelung vollständig gleich sind, d. h.

$$c_2 = c;\ n_1 = n;\ f(J n_1) = f(J n);$$

ferner sollen beide Maschinen mit einem Sättigungsgrade betrieben werden, der noch im geraden Teile unserer Kurve Fig. 44 verläuft, so lässt sich $f(J n_1)$ auch mit $c_1 \cdot J$ schreiben. Die Gleichung 51 erhält somit die nachstehende Modifikation

$$52.\qquad n_1 = n - \frac{E}{c_2 \cdot c_1} = n - c_{1n},$$

das heisst die Sekundärmaschine müsste theoretisch, sofern die Primärmaschine eine konstante Tourenzahl n besitzt, auch bei verschiedener Belastung innerhalb des geraden Teiles der Charakteristik mit einer konstanten Tourenzahl arbeiten. In Wirklichkeit wird dies jedoch nicht immer zutreffen, weil die Rückwirkung des Armaturstromes auf das magnetische Feld, wie wir später sehen werden, unter gewissen Umständen eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung annehmen kann, und zwar sucht sie bei der Primärmaschine das magnetische Feld zu schwächen, während sie dasselbe bei der Sekundärmaschine verstärkt. Die Gesamtwirkung der Armaturreaktion in Generator und Motor zusammen ist also nicht etwa gleich Null, sondern sie summiert sich. Man wird daher immer gut thun, auf die Magnete des Generators eine kleine Additionalwicklung zu bringen, während man die Spulen des Motors um den gleichen Betrag vermindert. Zudem muss natürlich vor allem aus darauf gesehen werden, die Ursache dieser Reaktionen durch geeignete Konstruktion (siehe Abschnitt VI) auf ein Minimum zu reduzieren.

Sollen beide Maschinen mit der gleichen Tourenzahl laufen, so hat dies nur eine Modifikation der Konstanten c und c_1 zur Folge. Es ist nämlich für diesen Fall

$$n_1 = \frac{c}{c_1} \cdot n - \frac{R}{c_1 \cdot c_2}$$

$$n_1 = n.$$

Hieraus folgt

$$n = \frac{c}{c_1} \cdot n - \frac{R}{c_1 \cdot c_2} \quad \text{oder}$$

$$c_1 = \left(c \cdot n - \frac{R}{c_2}\right) \cdot \frac{1}{n}.$$

Die abgeleiteten Formeln gelten, wie bereits bemerkt, nur für die Annahme, dass beide Maschinen noch im geraden Teile ihrer Charakteristik betrieben werden. Setzen wir nun den Fall, dass zwar Sekundär- wie Primärmaschine von gleicher Konstruktion und Bewicklung seien, hingegen mit einem höheren Sättigungsgrade laufen, so wird Gleichung 52 zu

53. $$n_1 = n - \frac{JR}{c \cdot f(Jm')}.$$

Der Zähler des zweiten Gliedes nimmt genau proportional der Stromentnahme zu, während uns ein Vergleich mit der Kurve 44 lehrt, dass die $f(Jm')$ nicht mehr im Verhältnisse zur Stromstärke J wächst, der Bruch ist daher auch nicht mehr konstant, sondern nimmt mit vergrössertem J langsam zu, d. h. die Sekundärmaschine wird bei verstärkter Belastung mit accellerierender Tourenverminderung laufen.

Es erübrigt noch zu zeigen, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn Motor und Generator sowohl hinsichtlich Form, als auch im Sättigungsgrade verschieden sind.

Die Gleichung $E_1 = E - JR$ lässt sich leicht graphisch darstellen, indem wir die interne Charakteristik der Primärmaschine

sowie die Gerade JR aufzeichnen. Da uns indessen der Spannungsverlust in der Sekundärmaschine vor der Hand noch unbekannt ist, so legen wir unsern Berechnungen einen zulässigen Verlust zu Grunde, den wir bei der nachträglichen Dimensionierung des Drahtes wo möglich zu erreichen suchen, wobei es bei relativ grossem Leitungsverluste ohne wesentlichen Einfluss auf das Resultat bleibt, wenn auch der später gefundene wirkliche Verlust nicht ganz genau mit unserer Annahme übereinstimmt.

Anmerkung. Um dem Einfluss der Armaturreaktion, deren Berechnung äusserst umständlich ist, zu begegnen, wird es in den meisten Fällen genügen, den Ohm'schen Verlust doppelt in die Rechnung einzusetzen.

Die Differenz aus den Ordinatenwerten der primären Charakteristik, vermindert um die entsprechenden Grössen JR, ergibt nun eine neue Kurve, nämlich die sekundäre Charakteristik (siehe Fig. 46).

Fig. 46.

Die sekundäre Maschine berechnet sich folglich in ganz gleicher Weise wie die primäre Maschine, nur ist ihre Anordnung derart zu treffen, dass die Ordinaten der sekundären Charakteristik und diejenigen der gefundenen Kurve III für die gleiche magnetisierende Stromstärke (nicht Ampère-Windungen) genau mit einander übereinstimmen. Ein oberflächlicher Vergleich der beiden Kurven I und III lässt sofort erkennen, dass eine Konstanz der sekundären Tourenzahl auch in den höhern Sättigungsgraden nur dann denkbar ist, wenn die Sekundärmaschine durchschnittlich mit einem höhern Sättigungsgrade als die Primärdynamo arbeitet, ein günstiger Faktor, der uns möglich macht, die Dimensionen des Motors etwas kleiner zu halten.

Wo die Variationen in der Belastung nicht wesentliche sind, ist es natürlich auch nur erforderlich, dass die sekundäre Charak-

teristik in denjenigen Punkten mit der Kurve III übereinstimme, innerhalb welcher sich die Schwankungen in der Arbeitentnahme vollziehen, während sie in den übrigen Teilen einen ganz anderen Verlauf nehmen kann.

Im übrigen darf die sekundäre Charakteristik aber auch nicht zu stark gekrümmt sein, weil eine derartige Form nur mit Zuhülfenahme einer starken Armaturreaktion erreichbar ist.

Die Nebenschluss-Maschine
oder
Shunt-Maschine.

(Siehe Fig. 47.)

Der Strom, welcher durch die Magnetwicklungen fliesst, ist nach dem Ohm'schen Gesetze

$$\mathfrak{J} = \frac{E}{R}$$

R Widerstand der zwischen 2 Bürsten hintereinander geschalteten Magnetwicklungen.

Da hier der Erregerstrom ziemlich unabhängig vom äussern Stromkreise ist, so wird natürlich auch die Bürstenspannung, abgesehen von einer kleinen Variation infolge Spannungsverlustes in der Armatur, bei konstanter Tourenzahl nahezu unveränderlich bleiben, ein Umstand, welcher die Nebenschlussmaschine besonders für Beleuchtungen mit verhältnismässig kleinem Leitungs-Widerstande geeignet macht; Maschinen mit grossem Armaturwiderstande bilden hievon allerdings eine Ausnahme.

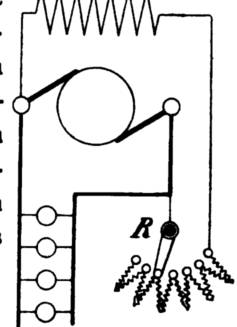


Fig. 47.

Über die Berechnung der Nebenschlusswicklung merke man sich vorläufig folgendes:

Es sei

$\mathfrak{J}m$ die pro Magnetspule erforderliche Anzahl Ampère-Windungen,

s Querschnitt des Magnetdrahtes,

$\mathfrak{L}$ mittlere Länge einer Magnetwindung,

E Bürstenspannung,

m Anzahl Windungen pro Spule,

m_1 Zahl der hintereinander geschalteten Magnetspulen,

J totaler Maschinenstrom, und

$\mathfrak{J} = \varepsilon J$ Strom, welcher durch die Magnete fliesst ($100 . \varepsilon = {}^0/_0$ Verlust), so ist

$$\mathfrak{J} = \frac{E}{R} = \frac{E}{m \,.\, m_1 \,.\, \frac{\mathfrak{L}}{60 \,.\, s}}.$$

Hieraus berechnet sich s, das jedoch mit Rücksicht auf die Widerstandszunahme mit der Temperatur ca. 20 % grösser anzunehmen ist.

54. $$s = \frac{(\mathfrak{J}m)\; m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50}.$$

Diese Formel gilt auch für Seriemaschinen.

Da ferner $\mathfrak{J} = s \,.\, i$ ist, so kann auch geschrieben werden:

55. $$m m_1 \,.\, \mathfrak{L} = \frac{E \,.\, 50}{i}.$$

Die linke Seite bedeutet die totale Drahtlänge.

$\mathfrak{J}m$ steht für die Anzahl Ampère-Windungen pro Magnet, ist somit eine zum voraus bekannte Grösse, desgleichen auch E, die Bürstenspannung; $\mathfrak{L}$ ergibt sich aus der Konstruktion der Maschine und muss schätzungsweise angenommen werden. Da es sich im Interesse nicht zu dünner Drähte empfiehlt, sämtliche Spulen hinter einander zu schalten, wodurch m_1 = der Anzahl Spulen überhaupt wird, so erhält s einen für jede Maschine ganz bestimmten, von der Stromstärke in den Magneten unabhängigen Wert; es ist daher nur noch m, die Anzahl Windungen pro Spule zu bestimmen.

$$56. \qquad m = \frac{\mathfrak{J}m}{\varepsilon \cdot J} = \frac{\mathfrak{J}m}{\mathfrak{J}}.$$

Beispiel 1. Eine kleine Maschine von 25 Volt Klemmenspannung bedürfe zur Erregung pro Magnetspule 2500 Ampère-Windungen. Die mittlere Länge einer Windung sei annahmsweise $\mathfrak{L} = 0{,}64$ m/, da beide Spulen in Serie geschaltet sind, ist somit $m_1 = 2$.

Wie gross ist der Drahtdurchmesser?

Nach Gleichung 54 ist

$$s = \frac{\mathfrak{J}m \cdot m_1 \mathfrak{L}}{E \cdot 50} = \frac{2500 \cdot 2 \cdot 0{,}64}{25 \cdot 50} = 2{,}56 \ \text{m/m}^2.$$

Drahtdurchmesser nach Tabelle II (am Schlusse des Buches) gleich $1{,}8$ m/m.

Beispiel 2. Für eine 2polige Maschine von 250 Ampères und 5 Volt ist die Nebenschlusswicklung derart zu bestimmen, dass man durch den Nebenschluss einen Stromverlust von ca. 7 % hat. Wie sind die Anordnungen zu treffen?

$$\mathfrak{J}m \text{ sei} = 4300$$
$$\mathfrak{L} = 0{,}5 \ \text{m/}.$$

Da beide Magnetspulen in Serie geschaltet werden, ist $m_1 = 2$.

Nach Gleichung 54 ist

$$s = \frac{\mathfrak{J}m \cdot m_1 \cdot \mathfrak{L}}{E \cdot 50} = \frac{4300 \cdot 2 \cdot 0{,}5}{5 \cdot 50} = 17{,}2 \ \text{m/m}^2.$$

Ferner nach Gleichung 56

$$m = \frac{\mathfrak{J}m}{\varepsilon \cdot J} = \frac{4300}{0{,}07 \cdot 250} = 246 \text{ Windungen pro Magnet.}$$

Im Anschlusse an das Gesagte liesse sich noch die Frage aufwerfen: Welcher Effekt wird erzielt, wenn wir beispielsweise bei einer 2poligen Lichtmaschine die beiden Magnetspulen nebeneinander statt hintereinander schalten?

Eine Lösung ist unschwer zu finden:

Bezeichnen wir mit r den Widerstand einer einzelnen Magnetspule, so ist

für Hintereinanderschaltung $R = 2 \cdot r$,

„ Nebeneinanderschaltung $R = \frac{r}{2}$.

Der totale durch die Magnete fliessende Strom würde somit $\frac{2 \cdot r}{\frac{r}{2}} = 4$ mal so gross als im vorigen Falle, oder, da durch jede Magnetwicklung die Hälfte dieses totalen Stromes fliesst, so ergeben sich als resultierende

$$\text{Ampère-Windungen} = \frac{4 \cdot \mathfrak{J}}{2} \cdot m = 2 \cdot \mathfrak{J} m.$$

Eine Anwendung hievon mag unter Umständen als Notbehelf dann gemacht werden, wenn die Maschine beim Versuche zu wenig Spannung gibt. Es ist dies jedoch immerhin ein bedenklicher Trost und heisst es deshalb bei der Berechnung von Nebenschlusswicklungen doppelt acht geben, weil ein Auf- und Abwickeln von Magnetwicklungen zu keinem Resultate führt. Dagegen kann einer allfälligen Erwärmung der Magnete dadurch abgeholfen werden, dass man mehr Windungen auf die Spulen bringt.

Anmerkung. Zum Laden von Akkumulatoren werden fast ausschliesslich Nebenschlussmaschinen verwendet. Hiebei empfiehlt es sich, in den Hauptstrom einen automatischen Minimalstrom-Ausschalter anzubringen, welcher, sobald der aus der Maschine kommende Strom unter ein gewisses Minimum sinkt, einfach die Verbindung zwischen Maschine und Akkumulatoren unterbricht.

Die Vorteile eines solchen Apparates werden aus einem Beispiele klar: Nehmen wir an, der die Dynamo antreibende Riemen gleite irgend einer Ursache wegen von der Riemenscheibe herunter, so erhält die Maschine sofort von den Akkumulatoren aus Strom. Befindet sich die Armatur noch in rascher Bewegung, so hat dies nichts zu sagen, indem sie einfach als Motor in der gleichen Richtung weiter getrieben wird. Ist dies jedoch nicht der Fall, was noch wahrscheinlicher ist, so wird die Akkumulatorenbatterie durch den im ruhenden Zustande äusserst geringen Widerstand der Armatur kurz geschlossen und der Zerstörung ausgesetzt. Letzterem kann zwar durch Anbringung von Bleisicherungen vorgebeugt werden; dagegen kann manchmal nicht vermieden werden, dass sich die Pole umkehren, wie ich schon öfters bei Maschinen von dem bekannten Manchester-Type beobachtete. Es scheint dies zwar im Widerspruche mit der Theorie der Nebenschlussmaschine zu stehen, weil der Magnetstrom in beiden Fällen die gleiche Richtung hat.

Ein Erklärung ist offenbar darin zu suchen, dass bei Kurzschluss der Batterie durch die Maschine durch das Anwachsen des Armaturstromes in der

Magnetwicklung ein Strom von entgegengesetzter Richtung erzeugt wird. Da überdies der Magnetstrom schon infolge der Verminderung der Spannung abnimmt, verschwindet schliesslich das Feld vollständig, resp. es wird durch den überwiegenden Armaturstrom umgekehrt.

Die Benutzung einer einzelnen Maschine zum Laden von Akkumulatoren hat stets gewisse Nachteile zum Gefolge. Da die Spannung der Akkumulatoren gegen das Ende der Ladung nämlich um ca. 35 % steigt, muss die Dynamo für diese maximale Spannung berechnet sein; sie ist daher während dem Parallelbetrieb äusserst schwach gesättigt und gibt leicht zum Feuern Veranlassung. Man wendet deshalb in fast sämtlichen grösseren Centralen mit Akkumulatorbetrieb besondere Zusatzmaschinen an, welche mit der Hauptmaschine in Serie geschaltet werden und die Mehrspannung liefern müssen. Da auch gleichzeitig mit der Zunahme der Spannung eine Verringerung der Ladestromstärke eintreten muss, können diese Zusatzmaschinen für eine etwas geringere Stromstärke berechnet werden.

Regulierung von Nebenschlussmaschinen.

Eine Betrachtung der Gleichung: $\mathfrak{J} = \frac{E}{R}$ lässt erkennen, dass man durch Hinzuschalten eines variablen Widerstandes zu den Magnetwicklungen $\mathfrak{J}$ beliebig variieren kann, folglich auch die Spannung. Da diese aber nicht proportional dem Erregerstrom $\mathfrak{J}$ ist, so hängt die Grösse eines solchen Rheostaten — der, wenn nicht besondere Verhältnisse vorliegen, gewöhnlich für Regulierung von 5—10 % der totalen Spannung berechnet wird — hauptsächlich vom Sättigungsgrade der Maschine ab, und fällt um so grösser aus, je grösser letztere ist.

Beispiel. Fig. 48 sei die Magnetisierungskurve einer Lichtmaschine von 110 Volt für separate Erregung und konstante Tourenzahl (700 per Minute). Widerstand der Magnete in Serie = $22\ \Omega$.

Wie muss der Widerstand des Regulators berechnet sein, um bei einer Tourenschwankung von ca. 28 % (14 % aufwärts und 14 % abwärts) noch auf konstante Spannung regulieren zu können?

Wir wollen zunächst den Armaturwiderstand vernachlässigen.

Es ist einleuchtend, dass die Spannung der Maschine bei konstanter Erregung im gleichen Verhältnis wie die Tourenzahl steigt oder fällt. Im einen Falle haben wir $1{,}14 \cdot 700 = 800$, im andern $0{,}86 \cdot 700 = 600$ Touren. Um daher bei einer Steigerung der Tourenzahl um 14 % die ursprüngliche Spannung von 110 Volt beizubehalten, muss die Erregung so gewählt werden, dass die derselben entsprechende Spannung multipliziert mit dem Verhältnis $\frac{800}{700}$ noch 110 Volt ergibt, d. h. wir suchen die Erregung für $110 \cdot \frac{700}{800} = 96{,}4$ V. auf. Dieselbe ist 3,1 Ampère.

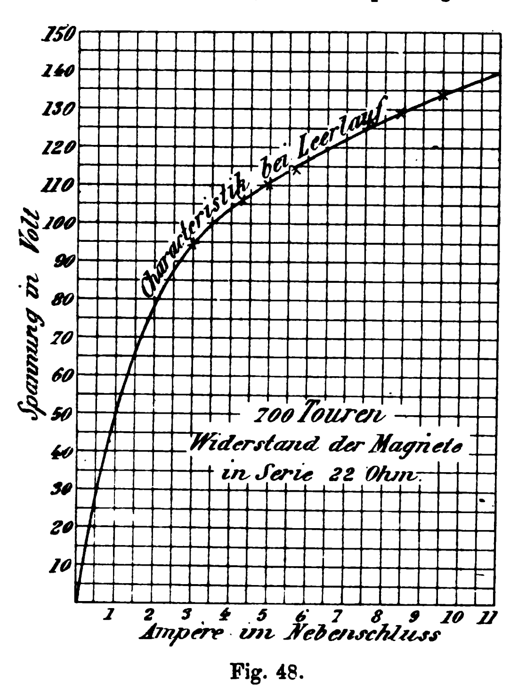


Fig. 48.

Bei normaler Tourenzahl ist die Erregung 5 Ampère, bei 600 Touren (siehe $110 \cdot \frac{700}{600} = 128$ V.) 8,3 Amp.

Nimmt man an, dass bei 600 Touren sämtlicher Widerstand ausgeschaltet ist, so muss die Magnetwicklung

$$\frac{110}{8{,}3} = 13{,}3\ \Omega, \text{ der Regulierwiderstand}$$

$$\chi = \frac{110}{3{,}1} - 13{,}3 = 22\ \Omega \text{ besitzen.}$$

Mit Berücksichtigung des Spannungsabfalls ändert sich nun die Sache ziemlich stark. Beträgt beispielsweise der Spannungsabfall bei voller Belastung 8 %, so ist die EMK, welche erzeugt werden muss, $\frac{110}{0{,}92} = 120$ Volt bei 700 Touren oder $120 \cdot \frac{700}{600} = 140$ bei 600 und $110 \cdot \frac{700}{800} = 96$ bei 800 Touren und Leerlauf; die entsprechenden Erregerströme sind 6,6, bezw. 11, bezw. 3,1 Ampère. Folglich Widerstand der Magnete $= \frac{110}{11} = 10\ \Omega$.

$$\text{Vorschaltwiderstand} = \frac{110}{3{,}1} - 10 = 25{,}5\ \Omega.$$

Das voranstehende Beispiel dient nur zur Illustration der Berechnungsmethode. Im allgemeinen jedoch dürften solche Tourenschwankungen wohl kaum vorkommen.

Anmerkung. Aus dem Beispiel ist ersichtlich, dass die Erregerstromstärke zwischen 3,1 und 11 Ampère variiert, es muss also dementsprechend auch der Regulierwiderstand so gehalten werden, dass die letzten Spulen eine dauernde Belastung von 3,1, die ersten 11 Ampère auszuhalten vermögen.

Da der Widerstand der Magnete mit der Temperatur zunimmt, die Stromstärke folglich abnimmt, so ist schon bei Beginn der Stromabgabe ein gewisser Widerstand im Magnetstromkreise vorgeschaltet, der mit Zunahme der Temperatur nach und nach ausgeschaltet wird.

Wo starke Wechsel in der Tourenzahl auftreten, oder auch zur Kompensierung des Spannungsabfalles infolge der Armaturreaktion wendet man öfters automatische Regulatoren an, dergleichen bei Parallelbetrieb mit Akkumulatoren. Versuche, welche übrigens seinerzeit von der Maschinenfabrik Oerlikon gemeinschaftlich mit der Akkumulatorenfabrik Haagen behufs Prüfung des Parallelbetriebes bei elektrischen Bahnen angestellt wurden, zeigten, dass man bis zu einem gewissen Grade das gleiche Resultat erreicht, indem man sowohl den elektrischen, als den Dampfmaschinenregulator aushängt.

Bei der elektrischen Strassenbahn Zürich, der ersten mit Akkumulatoren in der Centrale betriebenen Anlage, wurden der Sicherheit halber beide Regulatoren beibehalten.

Parallelschaltung von Nebenschlussmaschinen.

Bei Beleuchtungen mit zwei oder mehr Maschinen werden in der Regel alle parallel geschaltet,

1. um die unvermeidlichen Tourenschwankungen der die Maschinen antreibenden Motoren (Dampfmaschinen u. s. w.) möglichst auszugleichen,

2. um im Falle des Versagens einer Maschine die ihr zugeteilte Last gleichmässig und ohne Unterbruch des Betriebes auf die übrigen Maschinen übertragen zu können.

Zum nachträglichen Hinzuschalten einer neuen Maschine wandte man früher öfters eine sogenannte Lampenbatterie an, oder man liess die Maschine zuerst auf einen variablen Widerstand arbeiten. Fig. 49 stellt eine solche Anordnung dar: *AA* sind die Ampère-Meter, *V* das Volt-Meter. Nehmen wir an, die Maschine (I) befinde sich bereits im Gange, und es soll (II) hinzu geschaltet werden.

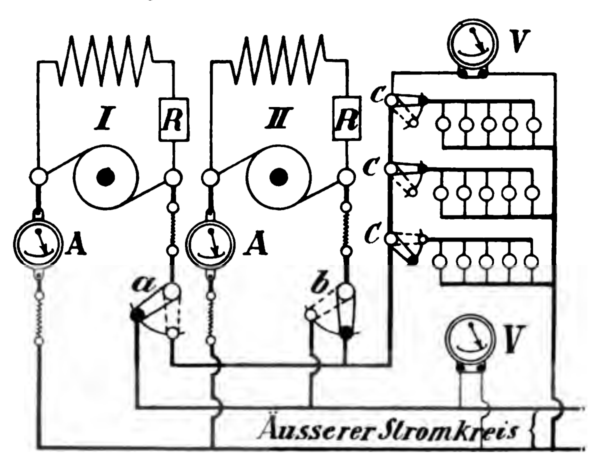


Fig. 49.

Es versteht sich von selbst, dass schon vor dem Betriebe der Kontakthebel *b* so gestellt werden muss, dass die Maschine (II) mit der äusseren Leitung nicht mehr in Verbindung steht, sondern mit der Lampenbatterie verbunden ist. Man lässt nun die Maschine langsam angehen, bis sie die volle Tourenzahl erreicht hat, schaltet dann successive Lampen der Batterie ein und reguliert mit dem Handregulator *R* der Maschine (II) so lange, bis diese gleiche Spannung und gleiche Belastung wie (I) zeigt, was an dem Volt-Meter und den beiden Ampère-Meter abgelesen werden kann. Nachdem dies geschehen ist, kann die Maschine durch Umschalten des Hebels *b* mit der ersten Maschine verbunden werden, und müssen

nachträglich noch beide Maschinen auf gleiche Belastung reguliert werden.

Eine solche Lampenbatterie ist aber durchaus nicht etwa unentbehrlich, im Gegenteil kann der gleiche Zweck auf einfachere Weise erreicht werden, wenn man die neue Maschine vor dem Einschalten so lange reguliert, bis sie ihre richtige Tourenzahl erreicht hat, und etwa 1—2 Volt weniger als die bereits im Gange befindliche gibt, dann schliesst man den Ausschalter *b* (Fig. 50) und reguliert nun an beiden Maschinen, bis ihre Leistungen nahezu gleich geworden sind. Bei genügender Vorsicht kann ein Steigen der Spannung vollständig vermieden werden.

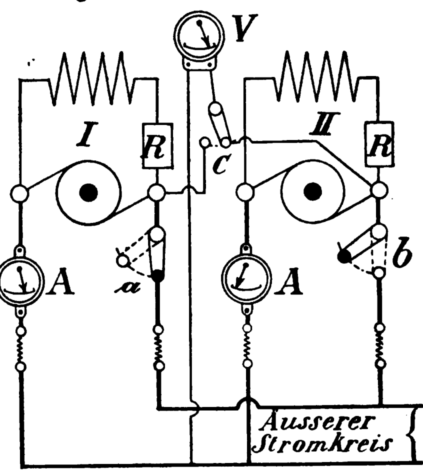


Fig. 50.

Nebenschlussmaschinen mit sehr geringer Sättigung lassen sich erfahrungsgemäss nicht gut parallel schalten. Desgleichen ist es nicht rätlich, Maschinen von verschiedener Grösse und Sättigung auf ein Netz arbeiten zu lassen, das grossen und schnellen Schwankungen in der Kraftentnahme ausgesetzt ist. Versuche, welche vor einigen Jahren in einer der Tramwaycentralen von Baltimore (Maryland) angestellt wurden, gelangen nach den Mitteilungen des dortigen Betriebschefs erst, nachdem die beiden Maschinen so lange geändert wurden, bis ihre Charakteristiken genau innerhalb den Grenzen, innert denen sich die Schwankungen vollzogen, übereinstimmten.

Die gleiche Erfahrung machte der Verfasser übrigens auch vor einem Jahre anlässlich der Ausstellung in Hamburg mit 4 parallelgeschalteten Maschinen von 2 verschiedenen Grössen. Solange die Maschinen schwach belastet waren, schlug das Ampère-Meter fortwährend von Null bis Maximum aus und es trat ein

ungefährer Gleichgewichtszustand erst bei annähernd voller Belastung ein.

Die Kompoundmaschine.

(Fig. 51 und 52.)

Wir haben bei der Serienmaschine gesehen, dass die Bürstenspannung bei einer Verminderung des äussern Widerstandes, resp. Vergrösserung des Stromes, zunimmt; umgekehrt hat bei der Nebenschlussmaschine eine Vergrösserung der Stromentnahme eine Zunahme des Armaturverlustes, mithin eine, wenn auch nicht bedeutende, Abnahme der Bürstenspannung zur Folge. Durch Kombination der beiden Schaltungsweisen sind wir daher im stande, nicht nur eine vollständig konstante Bürstenspannung an der Maschine zu erzeugen, sondern auch gewünschten Falles durch sogenanntes „Überkompoundieren“ die Spannung am Ende der Leitung selbst konstant zu erhalten.

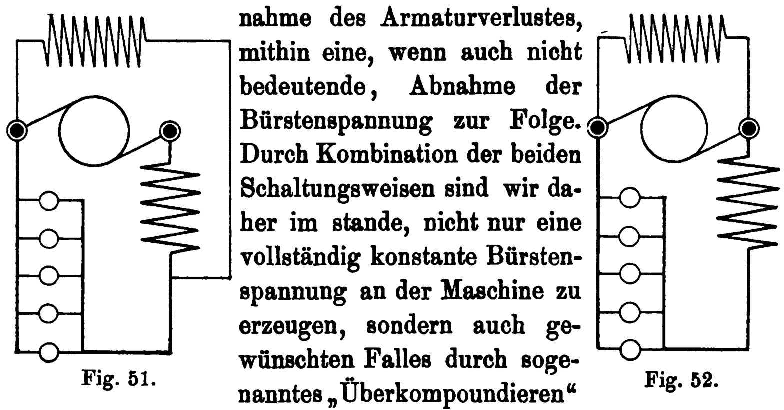


Fig. 51. Fig. 52.

Die Eigentümlichkeit der letztern Methode wird aus einem Beispiele sofort klar werden:

Setzen wir den Fall, die zu beleuchtende Anlage sei ziemlich weit von der Dynamomaschine entfernt, und es betrage der totale Verlust in der Leitung, wenn sämtliche Lampen eingeschaltet sind, ca. 14 % der gesamten Maschinenspannung*), so ist einleuchtend, dass auch bei vollständig gleichbleibender Bürstenspannung die Spannung am Ende der Leitung niemals konstant bleiben kann, sondern je nach der respektiven Belastung innert 14 % variieren wird. Die natürliche Folge hievon wird einesteils eine Unregelmässigkeit in der Beleuchtung, anderseits eine Überbeanspruchung

*) In Wirklichkeit darf dieselbe niemals so viel betragen.

der beim Ausschalten noch verbleibenden Lampen sein, womit in engerem Zusammenhange eine verminderte Brenndauer steht. Wenn nun auch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, diesem Übelstande mittelst geeigneter mechanischer oder elektrischer Regulatoren Abhülfe zu verschaffen, so würde dies immerhin zum mindesten eine Anlage komplizieren und verteuern; viel einfacher werden wir uns hiefür der Kompoundmaschine mit Überkompoundierung bedienen.

Als Generator werde die auf Seite 77 erwähnte Nebenschlussmaschine mit specieller Kompoundwicklung versehen benutzt (Fig. 52).

Es sei die Spannung am Ende der Leitung $= 110\ V.$
Widerstand der Lampen (300 von je 0,5
A. und 110 V.) $= 0{,}73\ Ohm,$
Widerstand der Leitung $= 0{,}12\ Ohm,$
Widerstand der Armatur $= 0{,}02\ Ohm,$
Widerstand der Kompoundwicklung $= 0{,}01\ Ohm.$
folglich Spannungsverlust in der Leitung
+ Dynamo bei Vollbeanspruchung $= \frac{110}{0{,}73} \cdot 0{,}15 = 23\ V.$

Um somit an den Lampen die erforderliche Spannung von 110 V. zu erhalten, müssen wir in der Maschine eine *EMK* erzeugen von

$$110 + 23 = 133\ V.$$

Die Erregung der Dynamomaschine setzt sich nun zusammen:

1. aus der Erregung der Nebenschlusswicklung (vorwiegend),

2. aus der Erregung der Kompoundwicklung (Serienwicklung), und zwar soll die letztere derart gewählt werden, dass die dadurch erzeugte Mehrspannung sich, wenn auch nicht proportional, immerhin in einem gewissen Verhältnisse zur Stromentnahme ändert, d. h. wären z. B. statt der 300 vielleicht nur 2 Lampen eingeschaltet, so würde der Armaturstrom von 150 A. auf 1 A. sinken. In diesem Falle kann der Verlust in der Leitung als 0 angesehen werden, ebenso die Mehrerregung, bedingt durch die Serienwick-

lung, und es muss daher die Nebenschlusswicklung allein im stande sein, jene 110 V. zu erzeugen.

Um nun einen Schluss auf die Berechnung der Kompoundwicklung ziehen zu können, wollen wir zunächst ohne Rücksicht auf die Zulässigkeit unserer Annahme sagen, es solle die Serienwicklung allein im stande sein, bei Vollbeanspruchung 23 V., entsprechend dem Gesamtverlust in der Leitung, Armatur und Kompound-Wicklung, zu erzeugen, so lässt sich die Spannungszunahme der letztern für eine beliebige Stromstärke nach der Formel bestimmen:

$$e = \frac{23}{150} \,.\, J = 0{,}15 \,.\, J.$$

Nehmen wir an, es würde von jenem Punkte, wo nur wenige Lampen brannten, auf einmal die Hälfte eingeschaltet, so steigt die Stromstärke auf

$$\frac{110}{2 \,.\, 0{,}73 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0{,}1} = 68\ A.,$$

und wir können uns die weiteren Vorgänge in der Dynamomaschine ungefähr in der nachstehenden Reihenfolge entstehend denken:

1. Spannung erzeugt in der Kompound-Wicklung $= 68 \,.\, 0{,}15 = 10\ V.$, daher Spannung an den Bürsten der Dynamo

$$= 110 + 10 - 68 \,.\, 0{,}02 = 118.$$

Gleichzeitig ändert sich aber auch der Strom im Nebenschlusse, und wir erhalten jetzt

2. eine Nebenschlusserregung = der $\frac{118}{110}$ fachen der frühern*), oder $\frac{118}{110} \,.\, 5 = 5{,}36\ A.$ (vergl. Fig. 48).

Nach der Figur entspricht dies einer Spannungszunahme von $2\ V.$

*) Dies trifft nur dann zu, wenn die Nebenschlusswicklung parallel zur Armatur geschaltet wird (Fig. 52).

Die Bürstenspannung steigt mithin auf

3. $118 + 2 = 120$ *V.*

Eine fernere Folge davon ist

4. eine Vergrösserung des Armaturstromes von *68* auf

$$\frac{120}{2 \cdot 0{,}74 + 0{,}01 + 0{,}12} = 75 \ A.$$

5. Steigerung der Spannung durch die Kompound-Wicklung um $(75 - 68)\ 0{,}15 = 1$ *V.*

Totale Spannung $= 120 + 1 = 121$ *V.*

6. Anwachsen des Erregerstromes auf $\frac{121}{110} \cdot 5 = 5{,}5$ *A.*

Spannungszunahme nach Kurve *48* = ca. *2 V.*
Totale Spannung $= 121 + 2 = 123$ *V.*

Diese Vorgänge müssen sich natürlich in ungemein kurzer Zeit entstanden gedacht werden. Wir sehen, die Bürstenspannung nähert sich schon bei halber Beanspruchung einem gewissen maximalen Werte von 123 Volt, oder da der Verlust in der Leitung ca. 9 V. beträgt, würden die Lampen am Ende derselben mit 114 V., also 4 V. Überbeanspruchung brennen, was schon zu viel ist, noch weit ungünstiger gestalten sich die Verhältnisse, wenn sämtliche Lampen brennen. Theoretisch müsste also die Serienwicklung für einen geringern Leitungsverlust berechnet werden.

Allerdings wurde bis jetzt angenommen, dass der Einfluss des Armaturstromes auf die Stärke des magnetischen Feldes vernachlässigt werden könne, was wohl in den wenigsten Fällen zutreffen mag, so dass man im allgemeinen am sichersten geht, wenn man für die Anordnung Fig. 52 die Kompoundwicklung ungefähr für den in der Leitung vorgesehenen Verlust berechnet, da eine nachträgliche Differenz durch eine kleine Änderung in der Serienwicklung leicht korrigiert werden kann. Wirkt die Kompoundwicklung zu stark, so mag man eine Schaltung der Magnete nach Fig. 51 vornehmen.

Kompoundmaschinen werden gleich wie die Nebenschlussmaschinen durch einen mit der dünnen Wicklung in Serie geschalteten variablen Widerstand reguliert.

Anmerkung. Zum Laden von Akkumulatoren eignen sich Kompoundmaschinen deshalb nicht, weil ein eventueller Rückstrom aus der Akkumulatorenbatterie die Magnete entmagnetisieren und Kurzschluss herbeiführen kann. Dennoch ist man unter gewissen Umständen genötigt, solche für den genannten Zweck zu benutzen, z. B. da, wo für die Beleuchtung bereits eine Kompoundmaschine vorhanden ist und man nachträglich noch Akkumulatoren zu Hülfe nehmen will, nur darf man es an der nötigen Sorgfalt nicht fehlen lassen, wenn Betriebsstörungen ausgeschlossen sein sollen.

Bei der elektrischen Tramanlage in Zürich, wo Kompoundmaschinen vorhanden sind, wird die Kompoundwicklung bei Parallelbetrieb mit den Akkumulatoren ausgeschaltet und nur bei reinem Maschinenbetrieb benutzt.

Parallelschalten von Kompoundmaschinen.

Um Kompoundmaschinen parallel schalten zu können, müssen diejenigen Bürsten, von denen die Kompoundwicklung abzweigt, durch einen Ausgleichdraht (a) mit einander verbunden werden, weil sonst bei Unregelmässigkeiten in den Tourenzahlen die schneller laufende Maschine einen Strom von entgegengesetzter Richtung durch die Kompoundwicklung der andern Maschine schicken würde (siehe Fig. 53).

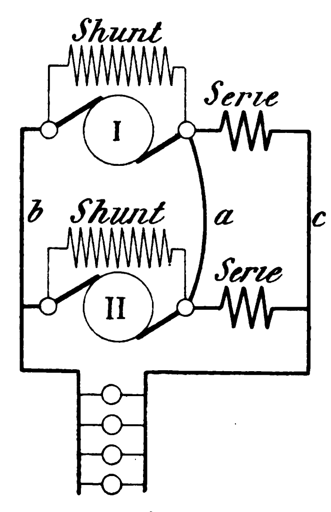


Fig. 53.

Beim Parallelschalten der zweiten Maschine wird zunächst der Ausgleichdraht eingeschaltet und zur Konstanthaltung der Spannung die erste Maschine sofort nachreguliert; hierauf wird auch die zweite Maschine auf normale Tourenzahl und Spannung (letztere vielleicht 1—2 V. geringer als die Spannung der im Betrieb befindlichen Maschine) gebracht und dann parallel geschaltet.

Um zu verhüten, dass eventuell aus Unvorsichtigkeit die zweite Maschine hinzugeschaltet wird, ohne dass die Ausgleichleitung eingeschaltet ist, hat der Betriebschef der Marseiller Tramanlage, Herr H. Dubs, im Electrician (1895) eine einfache Schaltung angegeben, welche darin besteht, dass die Spannung der zweiten Maschine nicht eher abgelesen werden kann, bis der Ausgleichdraht funktioniert. Die schematische Anordnung ist aus Fig. 54 ersichtlich.

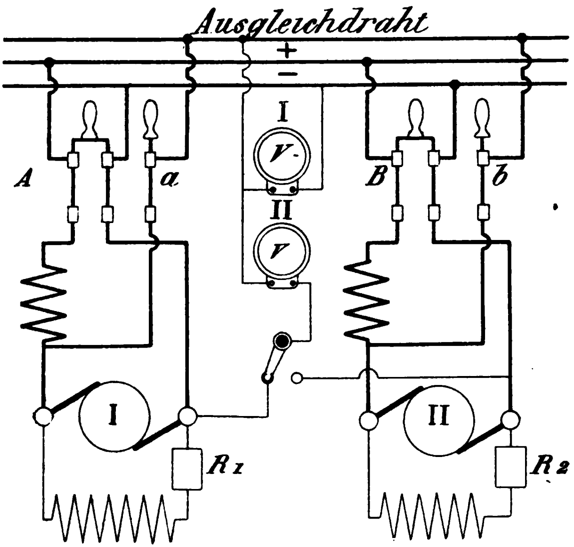


Fig. 54.

Nehmen wir an, es laufe Maschine Nr. I und es sei Nr. II parallel zu schalten. Zu diesem Zwecke wird der Hebel *b* geschlossen und Dynamo II auf Touren und Volt einreguliert, worauf der doppelpolige Ausschalter *B* geschlossen werden kann.

Beim Ausschalten verfährt man genau in umgekehrter Reihenfolge, reduziert jedoch vorher den Armaturstrom durch Einschalten von Widerstand in den Magnetstromkreis oder Verminderung der Tourenzahl so, dass er beinahe Null wird.

B. Vergleiche über die drei Wicklungsarten bei Kraftübertragungsmaschinen.

Die Serienmaschine im allgemeinen.

Die elektrischen Vorgänge beim Betriebe einer Kraftübertragung durch zwei Serienmaschinen lassen sich kurz in das nachstehende Résumé zusammenfassen:

Jede Änderung in der Belastung der Sekundärdynamo zieht eine entsprechende Vergrösserung oder Verkleinerung der gesamten elektrischen Stromstärke nach sich;

da nun die Spannung an der Primärdynamo nicht nur von ihrer Tourenzahl, sondern auch in weiterer Linie von der Erregung der Feldmagnete abhängig ist, so wird dieselbe sowohl an der primären, wie auch an den Klemmen der sekundären Maschine je nach der Belastung und dem Widerstande der Leitung innert beträchtlichen Grenzen schwanken.

Die variablen Grössen an der Sekundärdynamo sind nun:

1. die Klemmenspannung $E_1 = E - J\,R$,

2. die durch die Magnetwicklung erzeugte totale Induktion Φ; soll also hier die Tourenzahl konstant bleiben, so ist dies so lange der Fall, als der Quotient aus $\frac{E_1}{\Phi}$ eine konstante Grösse bleibt, wie gross auch die Schwankungen der Spannung seien.

Es geht schon daraus hervor, dass für die Bedingung einer vollständig konstanten Tourenzahl ein einfaches Parallelschalten zweier oder mehrerer Serienmotoren, wovon vielleicht nur einer erheblichen Schwankungen in der Kraftentnahme unterworfen ist, von einer einzigen primären Serienmaschine aus nicht mehr möglich ist, weil eben jede Änderung in der Beanspruchung dieses Motors eine Änderung der durch die primäre

Maschine fliessenden Stromstärke, somit ein Fallen oder Steigen der primären und mit ihr der Spannung an sämtlichen Motoren zur Folge hat, nicht aber eine in gleichem Masstabe stehende Verkleinerung oder Vergrösserung der Kraftlinienzahl in allen Motoren, wodurch deren Tourenzahlen höchst unregelmässige werden müssten.

Dieser Übelstand ist bei der in Fig. 55 gezeichneten Anordnung zum Teil vermieden. Wäre z. B. Motor (1) stärker belastet, so verteilt sich der durch die Armatur (1) fliessende Strom gleichmässig auf alle 3 Magnete, vorausgesetzt, dass die Magnet-Wicklungen gleichen Widerstand besitzen. Gerade hierin liegt aber das Bedenkliche, weil es praktisch beinahe unmöglich ist, die Widerstände ganz genau gleich gross herzustellen. Zudem wird häufig gewünscht, Motoren verschiedener Grössen von der gleichen Primärmaschine aus anzutreiben, in welchem Falle die genannte Bedingung so wie so nicht erfüllbar ist.

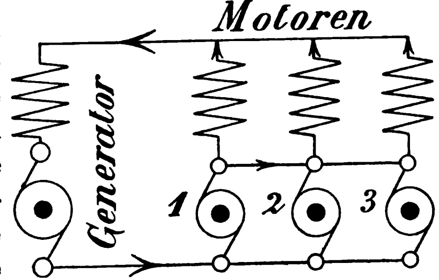


Fig. 55.

Es ist daher eine Anordnung wie Fig. 56 zeigt vorzuziehen, sofern die Motoren sich nicht zu weit von einander befinden, weil hier der Widerstand der Magnetspulen beliebig gross sein kann.

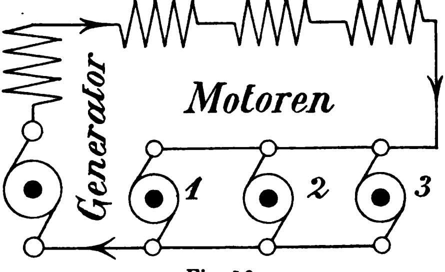


Fig. 56.

Ein Hintereinanderschalten gleichartiger Seriemaschinen hat trotz des bedeutenden Vorteils einer billigeren Leitung immer seine Nachteile, weil es für das Ein- und Ausschalten einzelner Motoren gewisse Schwierigkeiten darbietet. Ein Übelstand ist z. B. der, dass ohne specielle Reguliervorrichtungen beim Ausschalten eines oder mehrerer Motoren die übrigen schneller

laufen. Bei Verwendung von mehreren Primärdynamos könnte dem allerdings dadurch abgeholfen werden, dass man gleichzeitig eine äquivalente Zahl primärer Maschinen von der gleichen Stärke ausser Funktion stellen würde, was indessen, wie jeder, der schon mit derartigen Anlagen zu thun gehabt hat, weiss, nicht so ohne weiteres zu bewerkstelligen ist, besonders wenn jeder Generator einzeln von einer Turbine angetrieben wird. Man zieht es daher vor, sowohl Generatoren als Motoren mit automatischen Regulatoren zu versehen, welche bei ersteren auf konstante Stromstärken, bei letzteren auf konstanter Tourenzahl regulieren. Natürlich wird dadurch die Anlage in nicht geringem Masse kompliziert *).

Um sich den Vorteil einer möglichst billigen Leitung zu sichern und anderseits die Motoren beliebig ein- und ausschalten zu können, wendet man auch sehr häufig das sogenannte Dreileiter- oder Mehrleitersystem an**). Fig. 57 stellt das Schema für eine Dreileiteranlage dar.

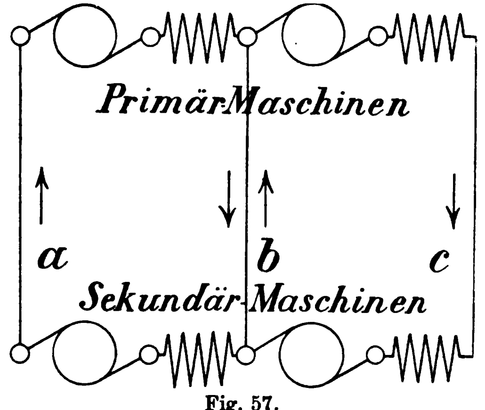


Fig. 57.

So lange die beiden Motoren gleich stark belastet sind, haben wir das nämliche wie 4 in Serie geschaltete Maschinen, und es wird durch den Mittelleiter *b* kein Strom fliessen. Sobald aber einer der Motoren mehr beansprucht wird als der andere, so fliesst durch *b* ein Strom, der gleich der Differenz in den Strom-

*) Obwohl eine Anzahl nach diesem System von der Cie. Industrielle in Genf gebauter Kraftübertragungsanlagen (zum Teil mit bedeutenden Distanzen und Spannungen) seit Jahren im Betrieb stehen und also über deren Ausführbarkeit keine Zweifel mehr herrschen, so drängt sich mir doch stets der Eindruck auf, dass hier der Gleichstrom seine Grenzen gefunden hat und vorteilhafter durch Drehstrom ersetzt würde.

**) Anlage Steirermühl mit zusammen 8 Maschinen.

stärken beider Sekundärmaschinen ist. Der maximale Strom entsteht in *b* natürlich dann, wenn einer der Motoren ganz leer lauft oder ausgeschaltet wird. Man wird daher zweckmässig diesen mittleren Leiter ebenso stark wie die beiden andern wählen, oder noch stärker, da sonst die Spannung im übrig bleibenden Motor zu starken Schwankungen unterworfen ist.

Von einer völlig gleichbleibenden Tourenzahl der Sekundärmaschinen bei allen Leistungen kann hier allerdings nicht mehr die Rede sein, in vielen Fällen hat dies aber auch nichts zu sagen.

Bei Kraftübertragungen auf grosse Distanz mit zwei Sekundärmaschinen wird also die Frage auftreten, ob das Dreileitersystem den beiden vorgenannten Anordnungen vorzuziehen sei. Ein allgemein richtiger Schluss lässt sich an dieser Stelle natürlich nicht ziehen, weil eben die örtlichen Verhältnisse ausschlaggebend sind. Es ist eine bekannte Thatsache, dass man mit der Spannung von Gleichstrommaschinen (speciell mit Ringarmaturen) bei genügender Sorgfalt ohne Bedenken bis auf 2000 Volt und höher gehen kann, ferner ist einleuchtend, dass eine Spannung von 1000 Volt für die menschlichen Organe genau ebenso gefährlich wird, wie eine solche von 2000 Volt; schliesslich muss bedacht werden, dass zwei Primärmaschinen von gleicher Leistung erheblich mehr kosten, als eine einzige von der doppelten Stärke, und dennoch wird man sich in manchen Fällen bestimmen lassen, das Dreileitersystem anzuwenden, sei es der grösseren Betriebssicherheit halber, oder auch dann, wenn es sich z. B. darum handelt, zwei an verschiedenen Orten befindliche Wasserkräfte für die gemeinsame Kraftübertragung auszunützen.

Aus nahe liegenden Gründen vermeidet man es, **Seriemotoren, die sehr variabler Belastung unterworfen sind, oder für Momente gar keine Arbeit abzugeben haben, in eine Stromquelle von konstanter Spannung einzuschalten.** Tritt nämlich ein solcher Moment ein, so fällt der Armatur- resp. Magnetstrom fast auf Null herunter und die Maschine wird mit kolossaler Geschwindigkeit zu drehen beginnen.

Tramway-Motoren.

Bei elektrischen Tramways, wo die Motoren gleichsam mit der Schiene gekuppelt sind, so dass sie überhaupt nie leer laufen können, wird man gerade Seriemaschinen den Vorzug geben, weil sie neben grösserer Isolierfähigkeit für das Anlaufenlassen und Regulieren u. s. w. verschiedene Vorteile besitzen *).

Bekanntlich lassen sich elektrische Tramway auf zwei Arten betreiben:

a) Mittelst Akkumulatoren, wobei die treibende Kraft auf dem Wagen selbst mitgeführt wird;

b) Mittelst oberirdischer oder unterirdischer Stromzuführung.

Dementsprechend muss auch die Reguliermethode verschieden gewählt werden. Bei Anwendung von Akkumulatoren speciell gestaltet sich diese sehr einfach. Man teilt die ganze Batterie in bestimmte, gleich grosse Abteilungen, deren Enddrähte zu einem Specialumschalter führen. Beim Anlaufenlassen schaltet man alle Abteilungen parallel. Da die Spannung sehr klein ist, läuft also der Wagen sehr langsam an; will man schneller fahren, so schaltet man einzelne Abteilungen hinter einander, und beim schnellsten Betriebe sind schliesslich alle Gruppen in Serie.

Wesentlich verschieden fällt die Regulierung bei der zweiten Anordnung aus.

Nach dem früher Gesagten sind 4 Methoden denkbar, um eine Veränderung der Tourenzahl herbeizuführen:

1. Man schaltet der Maschine einen Widerstandsregulator vor, mit welchem man die Spannung in zweckentsprechender Weise verändern kann;

---

*) Auch ganz kleine Dynamos von $\frac{1}{8} - \frac{1}{10}$ *PS* zum Antriebe von Nähmaschinen oder dergl., die an das Beleuchtungsnetz angeschlossen werden sollen, lassen sich aus technischen Gründen nur als Seriemaschinen ausführen. Hier ist aber ein „Durchbrennen" bei Nullbelastung um so weniger zu befürchten, als die Reibungsarbeit unverhältnismässig gross ist.

2. man behält eine konstante Spannung bei und reguliert durch einen, dem bei Akkumulatorenbetrieb erwähnten ähnlichen Umschalter die Magnetwicklung, wodurch sich die Linienzahl ändert;
3. man wendet beide Methoden gleichzeitig an. Es ist dies die rationellste Methode, während aber einige Konstrukteure einen speciellen Widerstand vorschalten, wählt beispielsweise der bekannte Amerikaner Sprague den Widerstand der Magnetwicklung derart, dass ein weiterer Widerstandskasten wegfällt.

   Ob dadurch ein Vorteil gewonnen wird, dürfte vielleicht bezweifelt werden, wenn man die überaus starke Erwärmung der Magnetspulen und deren schädlichen Einfluss auf die Isolation in Betracht zieht.
4. Sofern der Wagen 2 Motoren enthält, können beim Anlassen beide Motoren in Serie mit einem entsprechenden Widerstand geschaltet werden. Die Anlassgeschwindigkeit wird dadurch sehr reduziert. Wünscht man die Geschwindigkeit zu vergrössern, so wird successive Widerstand ausgeschaltet und nachträglich eine Parallelschaltung vorgenommen.

Die Theorie der Tramwaymotoren und ihre Regulierung ist für den heutigen Elektrotechniker von solcher Wichtigkeit, dass wir bei diesem Kapitel etwas länger verweilen müssen.

Die Geschwindigkeit des Motors ist gegeben durch die Formel

$$n = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot \frac{p_1}{p}.$$

Für die praktischen Berechnungen ist es nun fast immer bequemer, statt der Tourenzahl n die Wagengeschwindigkeit v in $^m/$ pro Minute in die Rechnung einzuführen.

Es bedeute D der Durchmesser der Wagenräder in $^m/$ und a das Übersetzungsverhältnis, so ist

$$v = \frac{n}{a} \cdot D\pi \text{ und}$$

$$v = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot p_1}{N \cdot \Phi p} \cdot \frac{D\pi}{a}.$$

Es soll in dem Nachstehenden nur der Seriemotor behandelt werden, der sich seiner besonderen Eigenschaften wegen in erster Linie als Tramwaymotor eignet.

Der Umstand, dass auf der Linie in der Regel eine grössere Zahl von Wagen gleichzeitig verkehren, bringt es mit sich, dass man fast ausschliesslich mit konstanter Spannnng in der Centrale arbeitet, so dass also die Spannung an den Motoren höchstens um den Betrag des Spannungsverlustes differieren kann.

Es sei

P das durch den Motor fortzubewegende Gewicht in Tonnen = Wagengewicht + Gewicht der Nutzlast + Gewicht der elektrischen Ausrüstung,

v wie oben die Fahrgeschwindigkeit in m/ per Minute,

α der Traktionskoefficient = 10—12 für Tramways und 4—6 für Bahnen,

β die Steigung in $^0/_{00}$.

Dann beträgt die effektive aufzuwendende Arbeit des Motors

57. $$PS = \frac{v \cdot P(\alpha + \beta)}{75 \cdot 60}$$

oder bei einem kommerziellen Nutzeffekt ζ findet man die Stromstärke

58. $$J = \frac{9{,}81 \cdot v P(\alpha + \beta)}{E \cdot \zeta \cdot 60} = c \cdot v(\alpha + \beta),$$

insofern P und E und ζ konstant angenommen wird.

Diese Formel soll uns dazu dienen, die Stromstärke und Fahrgeschwindigkeit auf beliebiger Steigung auszurechnen. Zu diesem Zwecke wird der Motor ein für allemal abgebremst und seine Tourenzahl und Stromstärke bei konstanter Spannung notiert. Durch mehr oder weniger starkes Anziehen der Bremse wird nun eine vollständige Versuchsreihe durchgeführt und das Resulat graphisch aufgetragen, wobei man statt der Tourenzahl die Fahrgeschwindigkeit in m/ per Minute oder auch beides angibt.

Fig. 58 zeigt eine solche Charakteristik.

Ist der Motor noch nicht konstruiert, so kann diese Kurve auch leicht auf rechnerische Weise gefunden werden, wobei berücksichtigt werden muss, dass die theoretische Tourenzahl entsprechend der Stromstärke zu reduzieren ist.

Wir haben nun zwei unbekannte Grössen J und v, für welche die Bedingung gilt, dass dieselben

1. auf der Charakteristik enthalten sein müssen,
2. der Gleichung 58 Genüge zu leisten haben.

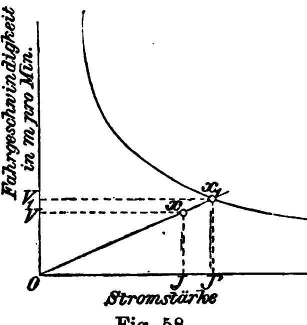


Fig. 58.

Die Aufgabe ist eine höchst einfache*): Wir berechnen J für ein ganz beliebiges v und ziehen durch den gefundenen Punkt x eine Gerade Ox nach dem Nullpunkt der Coordinaten; die Coordinaten des Schnittpunktes x_1 mit der Charakteristik entsprechen dann der gesuchten Fahrgeschwindigkeit v_1, bezw. Stromstärke J_1.

Für v wählt man natürlich einen Wert nahezu gleich der minimalen Geschwindigkeit, ausgenommen dann, wenn man die Geschwindigkeit in Gefällen ermitteln will, wo es sich der Genauigkeit halber empfiehlt, v grösser anzunehmen.

Beispiel. Es soll in einem bestimmten Falle berechnet werden, wie sich der Stromverbrauch und die Geschwindigkeit eines automobilen Wagens für 32 Personen auf verschiedenen Steigungen gestalte. Die maximale Steigung betrage 50 ‰. Den Traktionskoefficienten wollen wir zu 10 kg pro Tonne annehmen. Das komplette Gewicht des Wagens setzt sich nun, wenn man vorläufig das Gewicht der elektrischen Ausrüstung schätzungsweise einsetzt, wie folgt zusammen:

Gewicht des Wagens allein . .	*2,80*	Tonnen.
„ der elektrischen Ausrüstung	*1,40*	„
„ „ Personen . . .	*2,24*	„
Zusammen	*6,44*	Tonnen.

*) Vergl. Aufsatz des Verfassers „über die Regulierung von Tramwaymotoren" (Zeitschrift für Elektotechnik, Wien, 1. und 15. Juni 1893, ferner „Lösung prakt. Fragen über Gleichstrommaschinen auf graphischem Wege" (Elektr. Zeitschrift, 19. Juli 1894).

Maximale Zugkraft = $(10 + 50)\ 6{,}44 = 386$ kg.

Es ist nun zu untersuchen, ob die für eine solche Leistung bemessene elektrische Ausrüstung das obige Gewicht besitze; eventuell ist die Berechnung für die neue Annahme noch einmal zu machen.

Es sei hier vorausgesetzt, die erste Annahme sei zutreffend, ferner besitze der gewählte Motor die aus Fig. 59 ersichtliche Charakteristik.

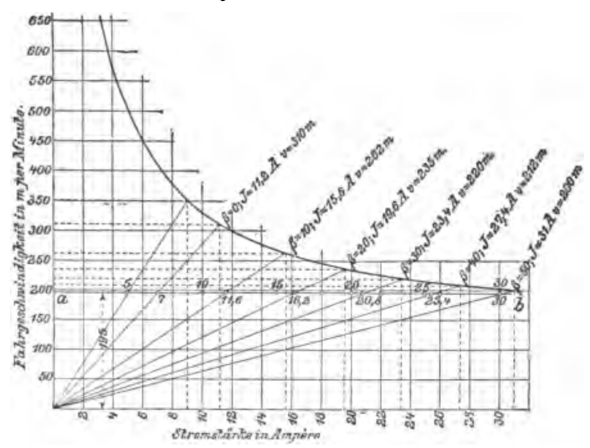


Fig. 59.

Mittlere Bürstenspannung $= 500$ Volt,
Nutzeffekt bei maximaler Belastung $\zeta = 0{,}82$.

Nach Gleichung 58 ist

$$J = \frac{9{,}81\, v\ .\ 6{,}64\ (\alpha + \beta)}{500\ .\ 0{,}82\ .\ 60} = 0{,}00256\ v\ (\alpha + \beta).$$

Nimmt man beispielsweise $v = 195$ m/ pro Minute an, so erhalten wir folgende für die Berechnung bequeme Formel

$$J = 0{,}5\ (\alpha + \beta),$$

welcher allerdings der maximale Nutzeffekt zu Grunde liegt; die Folge davon ist, dass J etwas kleiner, v daher grösser als in Wirklichkeit ausfällt. Wir werden weiter unten sehen, wie das Resultat für genaue Berechnungen zu korrigieren ist, der Einfachheit halber sei ζ zunächst konstant angenommen, ferner die Fahrgeschwindigkeit $v = 195$ m/. Es ist dann für

$\beta = 0$ ‰ $\quad J = 5$ Ampère,
$\beta = 10 \quad J = 10$ „
$\beta = 20 \quad J = 15$ „
$\beta = 30 \quad J = 20$ „
$\beta = 40 \quad J = 25$ „
$\beta = 50 \quad J = 30$ „

d. h. für je 10 $^0/_{00}$ Steigung gleich 5 Ampère mehr als in der Ebene. Wir ziehen also im Abstande 195 zur Abscissenaxe die Parallele ab und tragen auf derselben die obigen Stromstärken mit dem Zirkel auf. Verbinden wir diese Punkte noch mit dem Coordinatenanfang, so erhalten wir in den Schnittpunkten mit der Charakteristik erste Annäherungswerte.

Diese Methode reicht in der Regel für die gewöhnlichen Projektsberechnungen vollständig hin, um so mehr, wenn man für ζ nicht den maximalen, sondern einen mittleren Wert einsetzt.

Sehr genaue Resultate sind auf folgende Weise erhältlich: Wir sehen, dass die maximale Stromstärke, d. h. diejenige, bei welcher $\zeta = 0,82$ wird, 31 Ampère beträgt. In der Ebene sind dann noch ca. 9 Ampère, d. h. 30 $^0/_0$ der Maximalleistung, erforderlich.

Nehmen wir hier noch den Nutzeffekt zu $58^1/_2$ $^0/_0$ an (eine Zahl, die nur zur bessern Darstellung so klein gewählt wurde, in Wirklichkeit ist sie bedeutend grösser), so wird für $\beta = 0$

$$J = 5 \cdot \frac{82}{58,5} = 7 \text{ Ampère},$$

oder 2 Ampère mehr als berechnet wurde; für $\beta = 50$ ist die Differenz gleich Null.

Um also bei der Geschwindigkeit 195 die richtigen „Hülfs"stromstärken zu finden, haben wir, von dem Punkte $\beta = 50$ ausgehend, die Stromstärken wie folgt zu korrigieren:

$$\begin{array}{ll}
\beta = 50\ ^0/_{00} & J = 30, \\
\beta = 40 & J = 25 + 0,4 = 25,4, \\
\beta = 30 & J = 20 + 0,8 = 20,8, \\
\beta = 20 & J = 15 + 1,2 = 16,2, \\
\beta = 10 & J = 10 + 1,6 = 11,6, \\
\beta = \ \ 0 & J = \ \ 5 + \ \ 2 = \ \ 7,
\end{array}$$

im übrigen bleibt der weitere Rechnungsgang der gleiche.

In Gefällen unter 10 $^0/_{00}$ ist β von α zu subtrahieren.

Das einzige Beispiel mag genügen, um zu zeigen, dass Tramwaymotoren vor allem aus stark gesättigt sein sollen, damit die Geschwindigkeit in der Ebene nicht übermässig gross ausfällt.

Wir wenden uns nun zu den verschiedenen im Gebrauch befindlichen Reguliermethoden:

a) **Regulierung mittelst Vorschaltwiderstand.**

Nehmen wir an, ein Motor laufe in irgend einer Steigung und ohne Widerstand mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit v, wobei die Stromstärke J Ampère und der Widerstand der Magnete und der Armatur r Ohm betragen soll, so ist

$$v = c \cdot \frac{E - Jr}{\Phi} = \frac{E - Jr}{f(J)},$$

ferner die geleistete effektive Arbeit

$$A = J(E - Jr) - \chi.$$

χ stellt den Hysteresis- und Reibungsverlust dar. Um die Geschwindigkeit des Motors auf diejenige von v_1 zu reduzieren, muss der Maschine ein Widerstand R vorgeschaltet werden. Wir wollen nun ohne Rücksicht auf die Richtigkeit unserer Voraussetzung annehmen, es ergebe sich bei der neuen Geschwindigkeit v_1 eine Stromstärke J_1, so muss natürlich

$$v_1 = \frac{E - J_1(r + R)}{f(J_1)} \text{ sein und}$$

die nunmehr geleistete effektive Arbeit ist

$$A_1 = J_1 \left[E - J_1(r + R)\right] - \chi_1.$$

Es ist klar, dass sich

$$A : A_1 = v : v_1$$

verhalten muss, oder, indem wir die einzelnen Werte einsetzen:

$$\frac{J\left(E - Jr\right) - \chi}{J_1\left(E - J_1(r + R)\right) - \chi_1} = \frac{\dfrac{E - Jr}{f(J)}}{\dfrac{E - J_1(r + R)}{f(J_1)}}$$

$$Jf(J) - f(J)\frac{\chi}{E - Jr} = J_1 f(J_1) - f(J_1)\frac{\chi_1}{E - J_1(r + R)}$$

Augenscheinlich ist

$$\chi : \chi_1 = v : v_1.$$

Setzt man die einzelnen Werte von v und v_1 ein, so folgt:

$$J \,.\, f(J) = J_1 f(J_1).$$

Aus dieser Gleichung geht notwendigerweise hervor, dass $J = J_1$ sein muss, denn wäre z. B. $J_1 >$ oder $< J$, so muss auch $f(J_1) >$ oder $< f(J)$ sein und um so mehr das Produkt.

Wir gelangen übrigens auf weit schnellere Weise zum nämlichen Resultat, wenn wir die Zugkraft als das Produkt aus Strom $\times$ Feldintensität betrachten, d. h. $J f(J) = J_1 f(J_1)$ (vergleiche Seite 10).

Man kann also durch Vorschalten von Widerstand allerdings irgendwelche beliebige Geschwindigkeitsänderung erzielen, die Stromstärke bleibt aber stets dieselbe, ob Widerstand vorgeschaltet ist oder nicht.

Beispiel 2. Ist der Traktionskoefficient = 10, so fängt der Wagen erst bei 10 $^0/_{00}$ Gefälle von selbst zu laufen an, bis dahin muss dem Motor Strom zugeführt werden. Wollte man nun die Geschwindigkeit mittelst eines Widerstandes reduzieren, so würde derselbe wegen der kleinen Stromstärke viel zu gross ausfallen. Man begnügt sich daher mit einem Widerstande, welcher die Geschwindigkeit in der Ebene oder bei ganz kleinen Gefällen bis vielleicht 5 $^0/_{00}$ auf das maximale Mass beschränkt und schaltet den Motor, sobald die Geschwindigkeit in den übrigen Gefällen zu gross wird, einfach zeitweise aus.

Bei 5 $^0/_{00}$ Gefälle haben wir im vorigen Beispiele (Fig. 59) ca. 380 $^m/$ per Minute und 7,6 Amp. Soll die maximale Steigung nicht mehr als 250 per Minute betragen, so ist die Spannung auf

$$500 \,.\, \frac{250}{380} = 330 \text{ zu reduzieren.}$$

$$\text{Folglich Vorschaltwiderstand} = \frac{500 - 330}{7,6} = 22,4\ \Omega.$$

b) Regulierung mittelst Umschalten der Magnete (Sprague).

Bei der Sprague'schen Reguliermethode erhält jede der beiden Magnetspulen 3 Abteilungen, wobei je eine Spule des einen Schen-

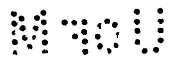
kels mit der gleichen des andern in Serie ist. Durch eine Walze mit Kontakten lassen sich folgende 7 in der nachstehenden Tabelle verzeichnete Schaltungen vornehmen:

Position	Art der Schaltung	Schema	Zahl der *a w*	Widerstand der Magnetspule
1	Spulen *a b c* in Serie		$3\,Jm$	$3\,r$
2	Spule *b* und *c* in Serie, *a* kurzgeschlossen		$2\,Jm$	$2\,r$
3	Spule *b* und *c* in Serie, *a* ausgeschaltet		$2\,Jm$	$2\,r$
4	Spule *a* und *b* parallel und in Serie mit *c*		$2\,Jm$	$1{,}5\,r$
5	Spule *a* und *b* parallel, *c* kurzgeschlossen		Jm	$0{,}5\,r$
6	Spule *a* und *b* parallel, *c* ausgeschaltet		Jm	$0{,}5\,r$
7	Spulen *a b c* parallel		Jm	$0{,}33\,r$

NB. Die Widerstandsangaben gelten für die Annahme, dass alle Magnetspulen gleichen Widerstand haben; bei der ursprünglichen Sprague'schen Anordnung trifft dies nicht genau zu.

Man sieht, die Schaltungen 3 und 6 bringen gegenüber 2 bezw. 5 absolut keine Änderung, weder des Feldes noch des Widerstandes, hervor; die Zahl der Schaltungen von verschiedenen Wirkungen reduziert sich folglich auf 5. Die Positionen 3 und 6 sind indessen unvermeidlich, weil sonst im Apparate beim direkten Übergang auf die Positionen 4 und 7 Kurzschlüsse entstehen würden.

Verglichen mit der reinen Widerstandsregulierung hat diese Methode den Vorteil grösserer Ökonomie; unbequem dagegen wer-



den die vielen Leitungsdrähte, ferner wird der Wicklungsraum infolge der grössern Isolation nicht genügend ausgenutzt.

Selbstverständlich ist auch bei dieser Methode ein besonderer Anlasswiderstand nicht unentbehrlich.

Der gleiche Zweck wird bei der nachstehenden Methode auf einfachere Weise erreicht.

c) Regulierung durch Parallelschaltung eines Widerstandes zu den Magneten.

Die Eigentümlichkeit derselben besteht darin, dass die Magnetwicklung für eine geringere Stromstärke als die Armatur dimensioniert wird und dementsprechend mehr Windungen erhält. Sowie nun die Stromstärke diese Höhe übersteigt, so entlastet man die Magnete successive durch Parallelschalten von Widerstand.

In Fig. 60 stelle beispielsweise die Kurve I die Charakteristik eines gewöhnlich gewickelten Motors dar, v_2 sei die maximal zulässige Geschwindigkeit entsprechend einer Steigung β_2. Ist die Steigung kleiner als β_2, so müssen wir die Geschwindigkeit durch einen Vorschaltwiderstand reduzieren, dieser führt aber notwendigerweise einen direkten Voltverlust mit sich.

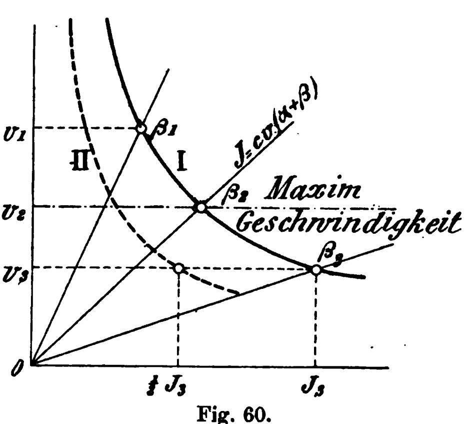


Fig. 60.

Versieht man dagegen die Magnete mit einer Wicklung von doppelt soviel Windungen, so erhält man die Charakteristik II, deren Abscissen halbsogross wie diejenigen der Kurve I sind. Die Schnittpunkte mit den Strahlen $0\,\beta_1$, $0\,\beta_2$ u. s. w. liegen nunmehr viel tiefer, so dass selbst bei einer Steigung

$$\beta_1 = \frac{1}{2}(\beta_2 - \alpha)$$

die maximale Geschwindigkeit nicht überschritten wird.

Der grosse Vorteil dieses Systems besteht in der Einfachheit des Regulierapparates, indem der nämliche Widerstand, der zum Anlassen dient, auch für das Parallelschalten benutzt werden kann (siehe Fig. 61). Diese Methode wurde vom Verfasser schon 1891 beim elektrischen Tramway in Marseille angewandt und ist seither bei sämtlichen neuern Tramanlagen der Maschinenfabrik Oerlikon in Gebrauch.

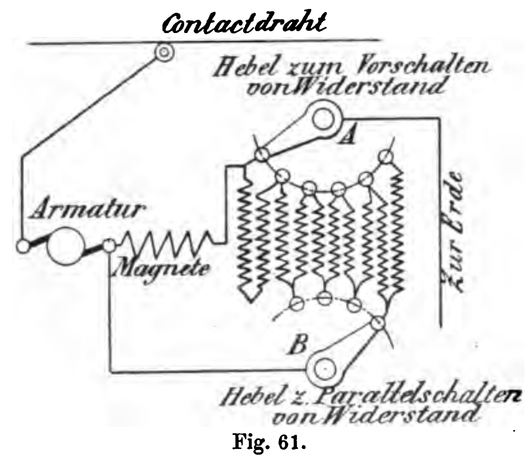


Fig. 61.

d) Serie-Parallelsystem.

Bei Wagen, welche mit 2 Motoren versehen sind, ist gegenwärtig das sogenannte Serie-Parallelsystem (Serie-multiple system) mit verschiedenen Variationen im Gebrauch.

Die Eigentümlichkeit desselben liegt darin, dass die Motoren je nach Bedürfnis hintereinander oder parallel geschaltet werden, wobei sich der Übergang mittelst einer der bereits behandelten Schaltungsweisen bewerkstelligen lässt. Die bekanntesten und am weitesten verbreiteten Regulierapparate mit dieser Einrichtung sind unstreitig diejenigen der Thomson-Houstom oder General Electric Co. und der Westinghouse Co. Ohne uns in die Konstruktions-Details derselben einzulassen, begnügen wir uns hier mit einer kurzen Übersicht der graphischen Manipulationen zur Bestimmung der Stromstärke und Geschwindigkeit auf einer beliebigen Steigung. Die verschiedenen Schaltungsweisen beider Systeme sind in der nachstehenden Tabelle veranschaulicht.

Die Analisierung der verschiedenen Positionen ist sehr einfach durchzuführen, indem man, von der Kurve einer einzelnen Maschine

ausgehend, diejenige für die übrigen Schaltungen konstruiert und die Schnittpunkte mit der durch die Gleichung 58 gegebenen Geraden aufsucht.

Obwohl die einzelnen Schaltungen zum Teil bereits behandelt wurden, sollen sie hier doch der besseren Übersicht halber noch einmal im Zusammenhange aufgeführt werden.

Position	Regulator Westinghouse Co.	General Electric Co.
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

1. Widerstand im Armaturstromkreis (Stellung 1, 2 und 3) und Armaturen in Serie (Fig. 62).

Kurve I Charakteristik für eine Maschine,

„ II „ „ zwei Maschinen, Motoren in Serie, wird erhalten, indem man die Ordinaten der ersten durch 2 dividiert.

R = Vorschaltwiderstand.

$$59. \qquad R = \frac{E}{J} \cdot \frac{a}{b}$$

$$a = \frac{RJ \cdot b}{E}.$$

2. **Schaltung** 4 und 5 (Westinghouse) (Fig. 63).

I Kurve eines einzelnen Motors,

II und III „ der beiden Motoren bei Serieschaltung.

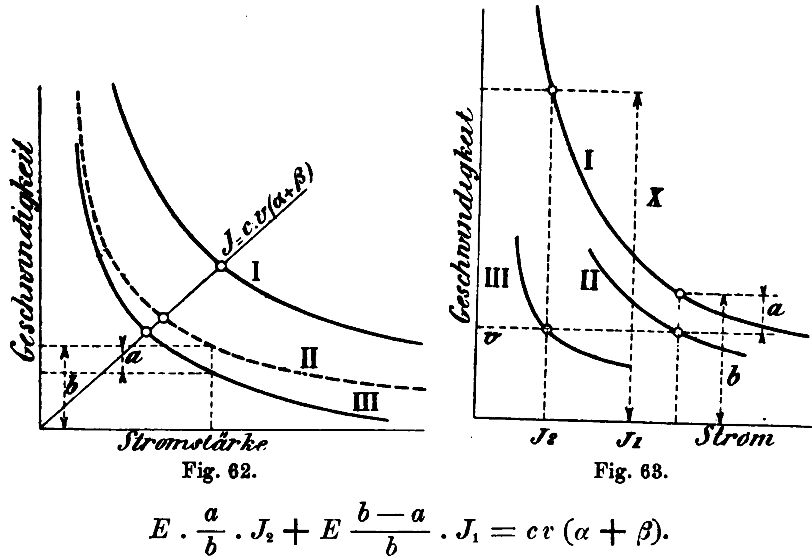


Fig. 62. Fig. 63.

$$E \cdot \frac{a}{b} \cdot J_2 + E \frac{b-a}{b} \cdot J_1 = c\,v\,(\alpha + \beta).$$

Ferner muss

$$\frac{a}{b} = \frac{b-a}{X} \text{ sein oder}$$

$$60. \qquad X = \frac{b\,(b-a)}{a}.$$

Diese Formel dient zur Bestimmung von J_2 und J_1. Für R gilt dann

$$61. \qquad (J_1 - J_2)\,R = \frac{E\,a}{b}.$$

Am schnellsten gelangt man zum Ziele, wenn man die Kurven für einen einzelnen und 2 Motoren in Serie aufzeichnet und zwischen diesen beiden 2 Kurven annimmt, aus denen a und b abgelesen und X und J_1 wie oben gezeigt bestimmt werden kann. Es verbleibt also nur noch R zu berechnen. Letzteres ist für eine bestimmte Schaltung 4 oder 5 konstant, die versuchsweise angenommenen Kurven müssen also demgemäss modifiziert werden.

Benutzt man wiederum die Gleichung 58 für die Strahlenbündel, so ergeben in diesem Falle die Schnittpunkte mit dem Motor ohne Widerstand, d. h. mit Kurve II, die gesuchten Geschwindigkeiten und Stromstärken.

3. Schaltung 8 und 9 (Westinghouse) (Fig. 64).

I Kurve eines einzelnen Motors,
II " " " " mit Widerstand,
III Kurve beider Motoren parallel mit "
IV " " " " ohne "

$$R = \frac{E}{J_2} \cdot \frac{a}{b}.$$

Aus dieser Gleichung wird die Kurve II berechnet unter zu Grundelegung eines bestimmten Widerstandes R, dessen ursprüngliche Annahme je nach Verhältnissen zu modifizieren ist. Die Kurve III wird durch Addition von J_1 und J_2 erhalten.

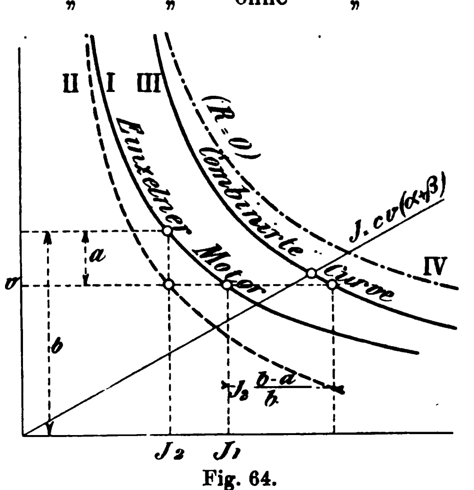


Fig. 64.

Hat man schliesslich sämtliche kombinierte Kurven auf diese Weise aufgezeichnet (Fig. 65), so erhält man ein anschauliches Bild der Wirkungsweise der verschiedenen Schaltungen auf allen möglichen Steigungen. Man kann sich auch so leicht Rechenschaft ablegen, wie gross die Geschwindigkeitsveränderungen je nach der

Steigung und Schaltung sind, bei welchen Übergängen Stösse vorkommen u. s. w.

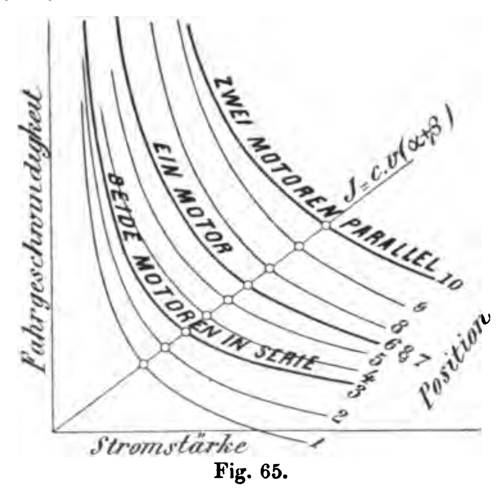


Fig. 65.

Beim Entwurfe von Kraftstationen für Traktionszwecke kommt ausser dem mittleren Stromverbrauch hauptsächlich der maximale Strom in Betracht. Leider gibt es keine Formel, welche den Anlassstrom mit absoluter Sicherheit zu berechnen gestattet, dagegen führt die nachstehende, meines Wissens zuerst von Oscar T. Crosby und Louis Bell (Electric Railway in Theory and Practice) angegebene empirische Formel zu einigermassen richtigen Resultaten.

62. $$J' \text{ (Anlassen)} = J \,.\, \frac{3\alpha + \beta}{\alpha + \beta}.$$

$J =$ Strom auf der Steigung, für welche der Anlassstrom zu berechnen ist.

In der Ebene ist $\beta = 0$, die Anlassstromstärke ist daher 3 mal so gross als wenn der Wagen im Lauf ist.

Diese Formel zeigt auch eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsresultaten, welche vor einigen Jahren von der Maschinenfabrik Oerlikon auf der Linie Zürich-Hirslanden angestellt wurden.

Die Nebenschlussmaschine.

Was die Nebenschlussmaschine als Motor anbetrifft, so haben wir bei Behandlung derselben als Generator gesehen, dass sie, abgesehen von einem kleinen Verluste, eine nahezu konstante Spannung beibehält, welches auch die Variationen in der Stromentnahme sein mögen. Umgekehrt würde sie als Motor betrieben bei jeder beliebigen Belastung innerhalb den normalen Grenzen mit ziemlich der gleichen Tourenzahl laufen *), dies natürlich auch dann noch, wenn an der gleichen Leitung noch andere Maschinen zu arbeiten haben. Im fernern bietet sie den Vorteil, dass die Magnete auch beim Leerlauf immer gleich stark gesättigt sind, so dass ein „Durchbrennen" der Maschine durchaus ausgeschlossen ist. Zum Anlaufenlassen eines solchen Motors bedarf es eines in den Armatur-Stromkreis eingeschalteten, wenn auch nur verhältnismässig sehr geringen Additional-Widerstandes, weil ohne diesen die Primär-Dynamo beim Einschalten eines Nebenschlussmotors, dessen Armatur im Ruhezustand sich befindet, einfach kurz geschlossen und entmagnetisiert würde. Das gleiche kann auch bei zu grosser Belastung des Motors eintreten.

Die Anwendung eines solchen Anlaufwiderstandes ist aber auch dann noch unerlässlich, wenn die Spannung des Generators nicht sinken könnte, weil der Widerstand der Armatur des Motors allein gegenüber demjenigen der Magnetwicklung so klein ist, dass durch die letztere überhaupt fast kein Strom mehr geht, wodurch die Maschine nicht die nötige Kraft erhält, um anlaufen zu können.

Anmerkung. Ein Kniff, der manchmal angewandt wird, um Nebenschlussmotoren ohne Widerstand angehen zu lassen, besteht darin, dass man eine der Bürsten für eine kurze Zeit abhebt, bis die Magnete vollkommen magnetisch geworden sind, worauf man sie wieder aufliegen lässt, nachdem man die Armatur vorher in möglichst schnelle Rotation versetzt hat.

---

*) Kleine Tourenänderungen liessen sich übrigens, wenn absolut erforderlich, durch eine Kompoundwicklung ausgleichen, die entgegengesetzte Stromrichtung zum Shunt haben muss; beim Anlassen muss dieselbe ausgeschaltet werden.

Solche Manöver sind verwerflich, weil sie leicht zu Drahtbrüchen Veranlassung geben: auch wird der Collector und die Bürsten dadurch beschädigt.

Soll die Geschwindigkeit der Nebenschlussmotoren verändert werden, so kann das mittelst des bereits erwähnten Widerstandes geschehen, der entsprechend gross gewählt werden muss, oder auch durch Hintereinander- oder Parallelschalten von Magnetwindungen. Die Wirkung äussert sich hier aber umgekehrt. Die Wicklung sei beispielsweise in 6 Abteilungen geteilt und es bedeute

E die Spannung an den Bürsten,
r den Widerstand einer Abteilung, und
m die Zahl der Windungen pro Abteilung,

so ist für

sämtliche Spulen in Serie: $aw = \frac{E}{6\,r} \,.\, 6\,m = \frac{E}{r} \,.\, m;$

3 und 3 Spulen in Serie: $aw = \frac{E}{\frac{3}{2} \,.\, r} \,.\, 3\,m = 2\,\frac{E}{r} \,.\, m;$

3 Gruppen à 2 Spulen: $aw = \frac{E}{\frac{2}{3} \,.\, r} \,.\, 2\,m = 3\,\frac{E}{r} \,.\, m;$

alle Spulen parallel: $aw = \frac{E}{\frac{1}{6} \,.\, r} \,.\, m = 6\,\frac{E}{r} \,.\, m.$

Der Motor wird also bei der ersten Schaltung am schnellsten und bei der Schaltung (4) am langsamsten laufen.

Es liegt ausser allem Zweifel, dass die Anwendung von Nebenschlussmaschinen (als Generator sowohl als auch als Motor) in vielen Fällen entschiedene Vorteile besitzt, dies besonders, wenn die Motoren an das Beleuchtungsnetz angeschlossen werden sollen und eine bei allen Belastungen konstante Tourenzahl gefordert wird, wie z. B. für den Antrieb von Werkzeugmaschinen u. s. w. Der Nebenschlussmotor kann aber auch dann noch angewandt werden, wenn der Verlust in der Leitung erheblicher wird, d. h. wenn die Bürstenspannung ziemlich variiert, indem er ziemlich unempfindlich gegen Spannungsschwankungen ist. Vollständig unempfindlich könnte er, soweit dies mit Rücksicht auf einen funken-

losen Gang zulässig ist, gemacht werden, wenn die Magnet-Verhältnisse der Sekundärmaschine derart gewählt werden, dass dieselbe beim Leerlauf, also dann, wenn der Spannungsverlust beinahe gleich Null wird und Primär- und Sekundär-Maschine die gleiche Spannung besitzen, noch mit einem Sättigungsgrade läuft, bei welchem Proportionalität zwischen Erregerstrom und Induktion herrscht. Der Beweis hierfür kann leicht erbracht werden:

$$v = c \cdot \frac{E}{\Phi}, \text{ oder da } \Phi = c_1 \frac{E}{R} \text{ ist}$$

$$v = c_2 R.$$

Die Erfahrung zeigt auch, dass das geringste Gewicht einer Dynamo-Maschine nur unter Anwendung jenes Sättigungsgrades erreichbar ist, welcher dem sogenannten Knie der Magnetisierungskurve, d. h. jenem Punkte entspricht, in welchem die Proportionalität zwischen Induktion und Erregung eine mässige Abnahme erleidet. Dies können wir aber leicht dadurch erreichen, dass wir zur Primär-Dynamo eine Kompound-Maschine, zum Motor eine Nebenschluss-Maschine wählen, wobei wir die Spannung an der Sekundär-Maschine durch sogenanntes Überkompoundieren konstant zu erhalten suchen. Es mag vielleicht noch als ein weiterer Vorteil der Kraft-Übertragung mit Kompound-Dynamos als Primär-Maschine gegenüber derjenigen mit reinen Nebenschluss-Maschinen der Umstand hervorgehoben werden, dass der Generator durch zu starke Belastung des Motors nicht entmagnetisiert werden kann. Aus letzterem Grunde werden Tramway-Generatoren stets kompound gewickelt.

C. Vergleichung der Drehrichtung bei Generatoren und Motoren.

Generatoren. Es wurde bereits auf Seite 6 angegeben, wie die Stromrichtung in Leitern zu bestimmen sei, die sich in einem magnetischen Felde senkrecht zu den Kraftlinien bewegen.

Es soll nun nachgewiesen werden, dass die Magnetwicklung einer Maschine in ganz bestimmter Weise mit der Armatur verbunden werden muss, um für eine gegebene Drehrichtung überhaupt einen Strom zu erhalten:

Maschinen, die zum ersten Mal laufen, müssen in der Regel zuerst eine kurze Zeit erregt werden, da die Magnetschenkel gewöhnlich noch keine ausgeprägten Pole besitzen. Ist dies aber einmal geschehen, so bleibt auch, nachdem die Erregung aufgehört hat, doch in den Magneten für immer ein gewisser permanenter Magnetismus zurück, der allerdings sehr gering, aber immerhin stark genug ist, dass in der Armatur beim Laufenlassen ein kleiner Induktionsstrom entstehen kann.

Hat man nun die Schaltung der Magnetwicklung richtig gewählt, so wird dieser anfangs nur ganz schwache Strom den remanenten Magnetismus verstärken. Dadurch steigt aber auch der Induktionsstrom; der stärkere Erregerstrom erzeugt eine grössere Linienzahl und so fort, bis ein gewisser Gleichgewichtszustand eingetreten ist, der einem bestimmten Sättigungsgrade entspricht.

Waren dagegen die Verbindungen unrichtig, so sucht der nun entstehende Armaturstrom die bereits vorhandenen Pole umzukehren. Dies ist nur möglich, indem die Magnete zuerst bis auf Null entmagnetisiert werden. Sobald aber das Feld gleich Null ist, so fällt auch der Armaturstrom auf Null herab, das heisst, die Maschine kann keinen Strom mehr geben.

Darf also die Drehrichtung nicht geändert werden, so bleibt nichts anderes übrig, als die Verbindungen mit den Spulen zu kreuzen, oder was unter Umständen noch besser ist, die Spulen

selbst mit einander zu vertauschen (nicht bei allen Maschinentypen von Erfolg).

Es soll hier noch auf einige Eigentümlichkeiten aufmerksam gemacht werden, die bei zu wenig Vorsicht leicht Unannehmlichkeiten bereiten können.

Vollständig gleich gewickelte Maschinen mit gleichen Drehrichtungen werden, je nachdem sie erregt wurden, verschieden gerichteten Strom erzeugen.

Es soll dies nun an einer Nebenschlussmaschine gezeigt werden, obwohl der Satz auch für die anderen Wicklungsarten gilt.

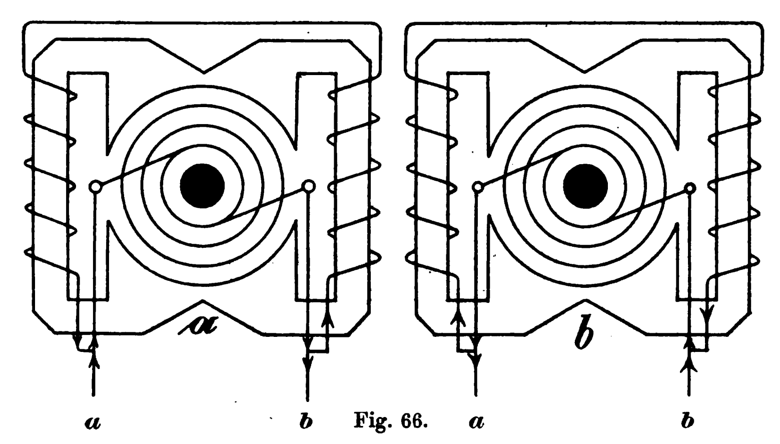


Fig. 66.

Nehmen wir an, die Maschine (Fig. 66 *a*) sei derart erregt worden, dass oben ein Nordpol und unten ein Südpol entsteht. Ferner soll bei einer bestimmten Drehrichtung in der Armatur ein Strom so induciert werden, dass *b* die positive Klemme ist. Verbindet man also die Magnetspulen, wie die Figur *a* zeigt, so kann sich ein starkes Feld bilden und die Maschine gibt Strom, der von der Klemme *b* ausgeht.

Wäre dagegen die Maschine umgekehrt erregt worden (Fig. 66 *b*), so dass der Südpol oben und der Nordpol unten ist, so hat natürlich auch der Armaturstrom eine umgekehrte Richtung, d. h. *a* wird positive und *b* negative Klemme.

Betrachten wir den Stromlauf in der Magnetspule (Fig. 66 *b*), so stellt sich heraus, dass auch der Erregerstrom oben einen Südpol und unten einen Nordpol zu bilden sucht, die Maschine kann also richtig funktionieren.

Bei reiner Glühlampenbeleuchtung bleibt es sich gleich, in welcher Richtung der Strom fliesse, wo dagegen Maschinen für Beleuchtung mit Bogenlampen, Galvanoplastik, oder zum Laden von Akkumulatoren u. s. w. verwendet werden, müssen die Pole vorerst geprüft werden, desgleichen auch, wenn Maschinen parallel geschaltet werden sollen.

Es mag bei dieser Gelegenheit bemerkt werden, dass bekanntermassen die Dauer von Glühlampen erhöht werden kann, wenn man die Pole der Maschine von Zeit zu Zeit umwechselt; doch wird hievon in der Praxis gewöhnlich keine oder sehr wenig Anwendung gemacht.

Zur Prüfung können die bekannten Specialapparate (Polsucher von Berghausen, Reagenzpapier oder dergl.) benutzt werden. Ist gerade eine Bogenlampe zur Hand, so schalte man dieselbe in den Stromkreis ein und unterbreche nach einer Weile den Strom. Diejenige Kohle, welche nach dem Ausschalten am längsten glüht, ist die positive. Sind Nebenschluss- oder Kompoundmaschinen parallel zu schalten, so können die gleichnamigen Pole mittelst zweier in Serie geschalteter Glühlampen gefunden werden. Zu diesem Zwecke verbindet man versuchsweise eine Klemme der einen Maschine mit einer beliebigen der anderen Maschine. Die beiden übrigen Klemmen werden mit den Glühlampen verbunden. Bei der richtigen Schaltung geht natürlich kein Strom durch die Lampen.

Wenn sich Maschinen längere Zeit auf dem Transporte befinden, so können sie durch die vielen Erschütterungen leicht ihren remanenten Magnetismus verlieren. Zur Neuerregung genügen einige Daniellelemente.

Anmerkung. Bei jeder Maschine, welche das Versuchslokal verlässt, sollten die Klemmen genau angegeben sein; es ist dies eine geringe Arbeit, welche dem Installateur oder Monteur manche Unannehmlichkeit und vieles Kopfzerbrechen erspart.

Motoren. Aus dem soeben Gesagten, wie auch aus der bereits auf Seite 8 angegebenen Regel geht hervor, dass die Drehrichtung von Motoren, bei welchen der Strom sowohl in Magnet als Armatur die gleiche, oder in beiden Teilen entgegengesetzte Richtung als im Generator hat, umgekehrt derjenigen des Generators ist.

Bei gleichgewickelten Seriemaschinen ist daher die Drehrichtung bei Motor und Generator immer verschieden. Nebenschlussmotoren laufen dagegen in der gleichen Richtung wie die Primärmaschine.

Es lassen sich hieraus noch einige weitere Schlüsse ziehen:

1. Seriemaschinen geben, als Generator in der gleichen Richtung gedreht, wie sie als Motoren laufen, keinen Strom, weil der allerdings entstehende und in umgekehrter Richtung fliessende Strom die Pole umzukehren sucht.

   Bei einer Kraftübertragung mit Seriemaschinen, wo die Sekundärmaschine z. B. mit einer Dampfmaschine auf die gleiche Transmission zu arbeiten hat, darf also die Primärmaschine auch bei geschlossenem Stromkreise ohne Bedenken abgestellt werden, während die Sekundärmaschine an der Transmission weiter läuft.

2. Nebenschlussmaschinen dagegen geben, durch mechanische Kraft im gleichen Sinne gedreht, wie sie als Motor laufen, einen entgegengesetzt gerichteten Strom. Würde man daher bei der genannten Kraftübertragung statt der Seriemaschinen Nebenschlussmaschinen verwenden, so müsste der Strom zuerst unterbrochen werden, bevor man die Primärmaschine abstellen darf, weil sonst letztere durch den aus der Sekundärmaschine kommenden entgegengesetzten Strom weiter getrieben würde (siehe Fig. 67 *b*). Aus dem gleichen Grunde darf man bei einer Beleuchtung, wo zwei oder mehr durch Dampfmaschinen separat angetriebene Nebenschlussmaschinen (oder auch Kompoundmaschinen) parallel geschaltet sind, eine der Dampfmaschinen erst dann abstellen, wenn die betreffende Dynamo vorerst aus dem Stromkreise ausgeschaltet ist.

3. Um die Drehrichtung eines Motors zu ändern, genügt es, den Strom entweder in den Magnetspulen, oder in der Armatur umzukehren. Hievon wird vor allem aus bei

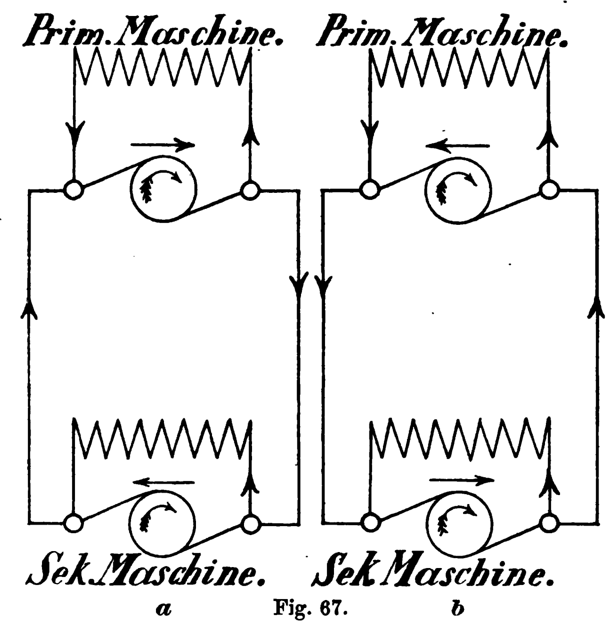


Fig. 67.

Tramwaymotoren Anwendung gemacht, wo es sich aus gewissen Gründen empfiehlt, den Armaturstrom umzukehren, während der Strom in den Magnetspulen immer in der gleichen Richtung cirkuliert. Auf diese Weise erhalten wir nämlich der Maschine immer einen ziemlich starken remanenten Magnetismus von gleich bleibender Polarität. Wollen wir nun den Motor selbst als Bremse benutzen, so schalten wir denselben aus dem Leitungsnetze aus und schliessen ihn durch einen Widerstand kurz, während wir gleichzeitig den Umschalter auf die entgegengesetzte Fahrrichtung einstellen.

Die Bremswirkung ist eine ausgezeichnete, oft nur zu energische. Sie äussert sich jedoch nur so lange, bis der Wagen eine gewisse

minimale (kritische) Geschwindigkeit erreicht hat (siehe folgendes Kapitel).

Anmerkung. Ein eigentümlicher Fall von Betriebsstörung bei einer Kraftübertragung mit gleichzeitiger Beleuchtung ist folgender: An einem gewissen Orte war als Primärdynamo eine Kompoundmaschine aufgestellt. Dieselbe hatte gleichzeitig den Strom für die Beleuchtung als auch für einen Nebenschlussmotor, der direkt mit einer Hülfsdampfmaschine auf die gleiche Welle anzutreiben hatte, zu liefern. Da der Regulator der Dampfmaschine ziemlich schlecht und erst bei einer etwas höhern Tourenzahl funktionierte, so kam es öfters vor, dass die Dampfmaschine etwas schneller als normal lief, wodurch natürlicherweise auch eine Vermehrung über die normale Tourenzahl der Sekundärmaschine eintrat. Dadurch aber verwandelte sich der Motor sofort in einen Generator und schickte einen Strom von entgegengesetzter Richtung durch die Seriewicklung der Primärdynamo, wodurch ein Fallen der Spannung und gleichzeitig ein Flackern der Lampen verursacht wird. Diesem Übelstande konnte leicht dadurch abgeholfen werden, dass man in den Nebenschluss der Sekundärmaschine einen Widerstand einschaltete, wodurch der Motor überhaupt etwas schneller laufen musste.

D. Elektrische Bremsung.

Das Prinzip der elektrischen Bremsung mit Benützung der Motoren als Generatoren, die auf einen Widerstand arbeiten, ist längst bekannt. Wenn dasselbe dessenungeachtet im Tramwaybetriebe noch keine grosse Verbreitung gefunden hat, so ist das hauptsächlich dem Umstande zuzuschreiben, dass es bei den äusserst beschränkten Dimensionen, welche für den Geschwindigkeits-Regulator und Widerstand zur Verfügung stehen, beinahe unmöglich ist, noch genügend viele Abstufungen für die Bremse zu erhalten, um in jedem Gefälle und bei beliebiger Belastung des Wagens die erforderliche Geschwindigkeit zu erreichen. Ist aber der Widerstand zu klein, so fahren die Wagen, besonders wenn sie wenig belastet sind, zu langsam. Eine weitere oft verderblich wirkende Eigenschaft der elektrischen Bremsen besteht noch darin, dass die Spannung der Maschine, sofern die Bremse bei zu grosser Geschwindigkeit in Thätigkeit gesetzt wird, öfters bedeutend über das normale Mass hinausgeht. Der Verfasser selbst hat bei Tramwaymotoren von

500 Volt nicht selten Stromstärken abgelesen, welche bei dem vorhandenen Widerstande über 1100 Volt ergaben. Selbstverständlich wird dadurch die Isolation sehr in Mitleidenschaft gezogen. Wenn man also auf der einen Seite eine Ersparnis an Bremsklötzen anstrebt, riskiert man anderseits, den doppelten Betrag für Neubewicklungen von Armaturen auszulegen u. s. w. Dessenungeachtet gibt es gewisse Fälle, wo die elektrische Bremsung, rationell angewandt, gewisse Vorteile besitzt. Ein solcher Fall bietet sich beispielsweise, wenn die Linie nach einer Richtung fortwährend grosse konstante Gefälle besitzt, wie z. B. die elektrische Bahnanlage Grütsch-Mürren, ausgeführt von der Maschinenfabrik Oerlikon, bei welcher die elektrische Bremsung seit 1889 in Anwendung steht.

Wir wollen nun den Vorschaltwiderstand bestimmen, welcher für eine bestimmte Wagenbelastung, Geschwindigkeit und Gefälle notwendig ist.

Die vom Motor als Generator abzugebende Arbeit ist durch die Gleichung

$$JE = \frac{9{,}81 \cdot v\,P\,(\beta - \alpha)\,\zeta}{60} \tag{63}$$

bestimmt. Während nun ζ mit etwelcher Sicherheit abgeschätzt werden kann, sind v, J und E unbekannt.

Für E besteht jedoch die bekannte Beziehung

$$E = \frac{v\,a}{D\,\pi} \cdot \frac{N\,\Phi}{60 \cdot 10^8} \cdot \frac{p}{p_1}\,(1 - \varepsilon).$$

Damit wir die gewöhnliche Geschwindigkeitskurve des Motors (Fig. 58) benutzen können, ist zu bedenken, dass dort

$$v_1 = \frac{E_1 \cdot 60 \cdot 10^8 \cdot p_1}{\Phi \cdot N \cdot p} \cdot \frac{D\,\pi}{a}\,(1 - \varepsilon).$$

Durch Multiplikation der beiden Gleichungen folgt daher

$$v_1 = v \cdot \frac{E_1}{E}\,(1 - \varepsilon)^2,$$

oder, indem wir den Wert von E aus der Gleichung 63 substituieren,

$$64. \qquad v_1 = E_1 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\zeta} \cdot \frac{60 \cdot J}{9{,}81\, P(\beta - \alpha)}.$$

Für eine approximative Berechnung genügt es, $(1-\varepsilon)^2 = \zeta$ zu setzen, indem der Widerstand schliesslich doch etwas grösser disponiert wird, als nach der Rechnung erforderlich wäre. Für die übliche Spannung $E = 500$ wird daher approximativ

$$65. \qquad v_1 = 3000 \cdot \frac{J}{P(\beta - \alpha)}.$$

Die Bedeutung dieser Gleichung soll an einem Beispiele gezeigt werden.

Beispiel. Fig. 68 gibt die Charakteristik eines 30 HP Tramwaymotors der Westinghouse Co. Dieser Motor sei auf einen Wagen montiert von 8 Tonnen Bruttogewicht.

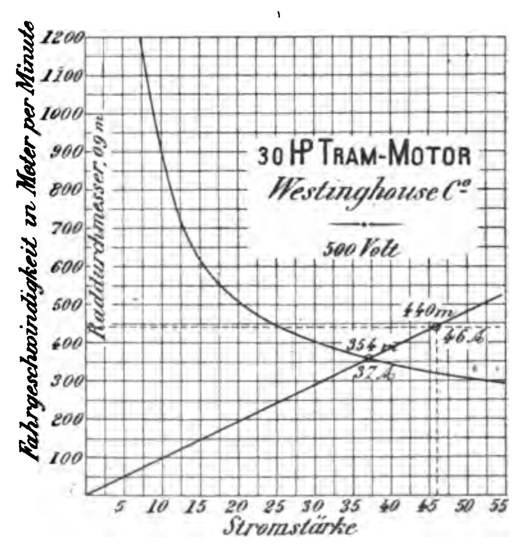


Fig. 68.

Man berechne nun den Vorschaltwiderstand derart, dass der vollbelastete Wagen auf einem Gefälle von 49 ‰ mit 240 m/ per Minute läuft. Spannung = 500 Volt.

Ganz approximativ ist

$$P(\beta - \alpha) = 8\,(49 - 10) = 312.$$

Daraus ergibt sich für ein beliebiges J, z. B. 46 Ampère,

$$v_1 = 3000 \cdot \frac{46}{312} = 440 \ {}^{m}/.$$

Zeichnet man diese Kurve auf, so erhält man als Schnittpunkt mit der Geschwindigkeitskurve die wirkliche Stromstärke $J = 37$ Ampère.

ζ mag zu $0{,}83$ (83 %) angenommen werden, dann ist nach Gleichung 63

$$E = \frac{1}{37} \cdot \frac{9{,}81 \cdot 240 \cdot 320 \cdot 0{,}83}{60} = 280 \ Volt.$$

Als Kontrolle wäre nun zu untersuchen, ob diese Stromstärke bei 37 Ampère thatsächlich erreicht wird. Der 37 Ampère entsprechende Wert von v_1 ist nach der Kurve 354 ${}^{m}/$. Folglich muss, wie oben gezeigt,

$$E = E_1 \cdot \frac{v}{v_1} \cdot (1 - \varepsilon)^2 \text{ sein.}$$

Nach den Abmessungen der Maschine ist $\varepsilon = 0{,}08$, folglich:

$$E = 500 \cdot \frac{240}{354} \cdot 0{,}922^2 = 288 \ Volt.$$

Die Rechnung stimmt also ziemlich genau. Wir nehmen das arithmetische Mittel $E = 284$. Es bleibt also nur noch der Widerstand zu berechnen, und zwar ist

$$R = \frac{284}{37} = 7{,}7 \ Ohm.$$

E. Umrechnung der Magnetwicklung bereits einmal ausgeführter Maschinen.

1. Ausbohrung der Magnete unverändert.

Es wurde schon in einem frühern Kapitel gezeigt, in welcher Weise die Berechnung der Armatur einer bereits einmal ausgeführten oder neu zu konstruierenden Maschine für irgendwelche elektrische Leistung durchzuführen ist. Hiebei legten wir unsern Berechnungen einen bestimmten magnetischen Sättigungsgrad B_l in der Luft zu Grunde.

Die weitere Aufgabe besteht nun darin, die Magnetwicklung derart zu bestimmen, dass jene Linienzahl B_l resp. Φ erreicht wird.

Hiezu bedürfen wir bloss die Magnetisierungskurve des gleichen bereits für irgendwelche andere elektrische Verhältnisse ausgeführten Maschinenmodelles, und mögen die nachstehenden Angaben einigen Anhaltspunkt bieten über die Art und Weise, wie solche Maschinen für den genannten Zweck am besten zu probieren sind.

Ist die betreffende Maschine eine Nebenschlussmaschine, so schalten wir in den Nebenschluss einen sehr grossen variablen Widerstand, sowie ein genaues Ampère-Meter ein und treiben die Armatur mit konstanter, möglichst hoher Tourenzahl an, wobei wir jedoch aus der Armatur keinen Strom entnehmen. Die Erhöhung der Tourenzahl hat den Zweck, auch höhere Sättigungsgrade messen zu können. Im übrigen ist jedoch eine separate Erregung vorzuziehen, falls es die Umstände erlauben. Schalten wir nun successive Widerstand aus und messen wir die jeweiligen verschiedenen durch den Nebenschluss fliessenden Ampère, so geben die an den Bürsten der Maschine erhaltenen Volt, oder noch besser die Werte von Φ als Ordinaten, die entsprechenden Ampère-Windungen als Abscissen aufgetragen, die verlangte Magnetisierungskurve dieser Maschine. Die nämliche Versuchsreihe führen wir auch durch, indem wir die Maschine auf einen Widerstand arbeiten lassen.

Im zweiten Male erhalten wir natürlich Punkte, welche von der Magnetisierungskurve ziemlich abweichen, und sollen uns diese dazu dienen, die leider nicht genau zum voraus zu bestimmende Armatur-Rückwirkung in den nachträglichen Rechnungen einigermassen berücksichtigen zu können. Gesetzten Falles, wir hätten mit den Ordinaten die Spannung in Volt bezeichnet, so modifizieren wir noch die beim zweiten Versuch erhaltenen Ablesungen derart, dass wir je zu den Ordinatenwerten die reinen Voltverluste in der Armatur addieren. Auf diese Weise gelangen wir zu einer weiteren Kurve, die, sofern keine schädliche Rückwirkung der Armatur auf das magnetische Feld stattfände, mit der zuerst erhaltenen Kurve übereinstimmen müsste, was in Wirklichkeit jedoch niemals ganz zutreffen wird.

Für eine Serie-Maschine führen wir die Versuche ebenfalls ganz ähnlich durch, und zwar erstens bei separater Erregung der

Magnete, wobei aus der Armatur kein Strom entnommen wird, und zweitens, indem wir die Maschine auf einen Widerstand arbeiten lassen.

Bei Kompoundmaschinen schliesse man die dicke Wicklung kurz; im übrigen gilt das für Nebenschlussmaschinen Gesagte.

Wenn es die Konstruktion der Dynamo-Maschine oder anderweitige Verhältnisse nicht gestatten, die Dynamo selbst mittelst Riemen oder dergleichen anzutreiben, so kann dieselbe an eine Stromquelle von konstanter Spannung eingeschaltet und als Motor laufen gelassen werden; in letzterem Falle tragen wir nicht die Spannung selbst, sondern die aus der Spannung ausgerechnete totale Induktion Φ als Ordinaten auf. Um den Armaturstrom variieren zu können, müssen wir hier die Maschine auf irgend eine Weise belasten und kann dies unter Umständen dadurch geschehen, dass wir mit derselben eine zweite Dynamo antreiben, welche wir auf einen variablen Widerstand arbeiten lassen.

Es sei bei dieser Gelegenheit noch auf eine Methode hingewiesen, welche seinerzeit in der Elektrotechnischen Zeitschrift vom Juli 1888 erschien und angibt, wie Dynamomaschinen, deren Kraftbedarf die verfügbare Leistung der Betriebsmaschine bis auf das 3—3$^1/_2$fache übersteigt, dennoch mit voller Belastung probiert werden können.

Hiezu sind 2 Dynamomaschinen erforderlich. Die zu prüfende Maschine wird von der Transmission aus mit ihrer normalen Geschwindigkeit angetrieben. In den Stromkreis derselben schalte man die zweite Dynamo in Serie mit einem variablen Widerstande. Die letztere Maschine übernimmt nun die Funktion eines Motors und hat mittelst Riemenantrieb die ihr zugeführte elektrische Arbeit, abzüglich der Verluste, wieder an die Transmission abzugeben. Die Wicklungsarten der beiden Maschinen sind ohne Belang, dagegen muss natürlich auf die Tourenzahl und die Spannung entsprechende Rücksicht genommen werden, ferner müssen die Regulierwiderstände eine sehr feine Einteilung besitzen.

Am besten ist es allerdings, wenn beide Dynamos vollkommen gleich gross sind, denn nur unter dieser Bedingung ist es möglich, die oben genannte Leistung zu erzielen.

Die Variationen in der Leistung der Versuchsmaschine werden dadurch erhalten, dass man entweder das magnetische Feld des Motors schwächt (durch Vorschalten eines Regulierwiderstandes vor die Magnetspulen bei Nebenschlussmaschinen), oder durch Veränderung der wirksamen Zahl Armaturwindung resp. Verstellung der Bürsten (bei Seriemaschinen).

Bei richtiger Wahl der Übersetzungsverhältnisse kann auf diese Weise der gewünschte Effekt vollkommen erreicht werden.

Beispiele über die Berechnung der Magnetwicklung.

Beispiel 1. Es sei eine Shunt-Maschine für eine Leistung von 120 Ampère und 400 Volt bei 650 Touren zu berechnen.

Da bereits die Modelle für eine Dynamo von 24 Ampère und 1740 Volt bei 700 Touren vorhanden sind, so benützen wir dieselben für den vorliegenden Fall und sehen einfach nach, wie die Armatur und die Magnete für die obige Leistung umzuwickeln sind.

Anmerkung. Die effektive Leistung des verwendeten Modelles ist zwar ziemlich geringer als die verlangte; es mag indessen schon hier gesagt sein, dass Maschinen, welche ursprünglich für eine hohe Spannung berechnet waren, für eine niedere Spannung umgewickelt, erfahrungsgemäss um 10—20 % mehr beansprucht werden können. Es rührt dies einesteils von der bei niederer Spannung geringeren Isolation, andernteils von dem Umstande her, dass eben der Querschnitt des Armaturdrahtes und mit ihm in nahezu gleicher Weise der Strom, welcher aus derselben herausgenommen werden kann, mit dem Quadrate der linearen Dimension wächst.

Die Versuchs-Resultate der ursprünglichen mit Serie-Wicklung und Gramme-Ring versehenen Maschine seien nachfolgende:

1. Bei separat erregten Magneten; Armatur ohne Strom.

Touren	Volt	Ampère-Windungen pro Magnetspule	Touren	Volt	Ampère-Windungen pro Magnetspule
700	400	1700	700	1500	8400
700	800	3300	700	1600	10000
700	1100	5100	700	1750	13500
700	1300	6700	700	1900	17000

2. Maschine erregt sich selbst.

Touren	Volt	Ampère	Ampère-Windungen pro Magnetspule	Ampère-Windungen Armatur
700	740	4	3400	2240
700	1230	8	6800	4500
700	1480	12,3	10500	6900
700	1650	17	14500	9500
700	1800	24	20400	13400

Die Versuchsresultate aus beiden Tabellen sind in Fig. 69 graphisch dargestellt.

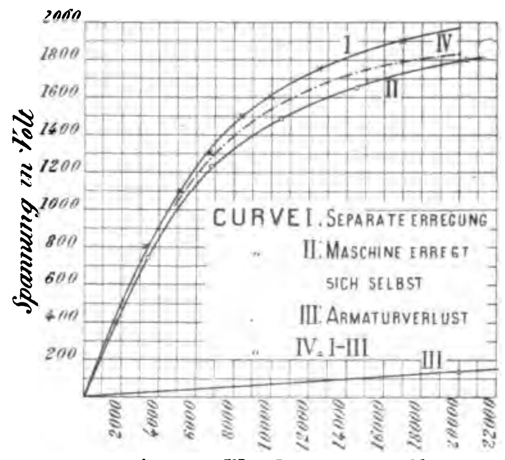


Fig. 69.

Daten der Versuchs-Dynamo: $D = 510$; $N = 1100$; Länge einer Windung $= 1\ ^m/_{200}$, Drahtdicke auf der Armatur $=$ $2\ ^m/_m$, folglich Widerstand einer Armaturhälfte $=$

$$\frac{550 \cdot 1{,}2}{50 \cdot \frac{2^2 \pi}{4}} = 4{,}2\ \Omega.$$

Widerstand der Magnete $= 2{,}9\ \Omega$ heiss.

Bei einer beliebigen Stromstärke, z. B. 24 Ampère, verlieren wir somit

$$24\ (2{,}1 + 2{,}9) = 120\ \mathit{Volt}.$$

Tragen wir diesen Volt-Verlust als Ordinate, die Stromstärke, oder, da in der Figur durch die Abscissen die Ampère-Windungen bezeichnet sind, die dieser Stromstärke entsprechende Zahl Ampère-Windungen (20400) als Abscissen auf, und verbinden wir diesen Punkt mit dem Nullpunkt des Koordinatensystems, so erhalten wir die Gerade III, deren verschiedene Ordinatenwerte wir zu Kurve II addieren.

Es zeigt sich hier ganz deutlich der Einfluss der Ankerreaktion auf das magnetische Feld, denn wäre dieser nicht vorhanden, so müsste Kurve IV mit Kurve I übereinstimmen, was allerdings nicht zutrifft. Für irgend eine Erregung, sagen wir beispielsweise 8000 Ampère-Windungen, fällt somit die Bürstenspannung nur infolge der Rückwirkung der 2600 auf der Armatur vorhandenen Ampère-Windungen um 100, das heisst 7 %. Wir begehen nun keinen grossen Fehler, wenn wir für die nachfolgenden Rechnungen der Einfachheit halber annehmen, der erwähnte Spannungsabfall sei direkt proportional der Anzahl Ampère-Windungen auf der Armatur (in Wirklichkeit gilt dies nur bei sehr niedrig gesättigten Magneten); wären daher statt der 1100 vielleicht 1500 Drähte auf der Armatur vorhanden, so würde der Spannungsabfall bei der gleichen Armatur-Stromstärke

$$7 \cdot \frac{1500}{1100} = 9{,}5\ \%\ \text{betragen.}$$

a) Berechnung der neuen Armatur.

Beanspruchung des Armaturdrahtes angenommen
$= 3{,}6$ Amp. pro $1\ \text{mm}^2$.

Draht-Querschnitt $= \frac{120}{2} \cdot \frac{1}{3{,}6} = 16{,}7\ \text{mm}^2$.

Drahtdicke d $= 4{,}6\ \text{mm}$ (nach Tab. II) oder isoliert
$= 5{,}1\ \text{mm}$.

Anzahl Drähte, welche auf der Armatur Platz finden, wenn jeder Draht dicht neben den andern zu liegen kommt,

$$n = \frac{510 \,.\, \pi}{5,1} = 314,$$

wofür wir mit Rücksicht auf allfällige Drivinghorns etc. 300 annehmen.

b) Berechnung der neuen Magnetwicklung.

Der Spannung von 400 Volt entspricht eine bestimmte Linienzahl, welche sich eventuell aus Gleichung 5 berechnen liesse. Dies ist aber nicht notwendig.

Um nämlich die ursprüngliche Charakteristik, Fig. 69, auch für die neue Maschine benützen zu können, brauchen wir nur nachzusehen, bei welcher Spannung des Versuchsdynamo die gleiche Linienzahl erreicht wurde und wie gross die hiefür notwendige Erregung war.

Diese Spannung ist offenbar:

$$E = 400 \,.\, \frac{1100 \,.\, 700}{300 \,.\, 650} = 1580 \text{ Volt.}$$

Nach Kurve I (Fig. 69) sind hiefür 9700 Ampère-Windungen erforderlich, vorausgesetzt, dass die Armatur stromlos ist. Bei vollem Strom dagegen haben wir in der zu berechnenden Maschine einen Spannungsverlust von

$$e = \frac{150 \,.\, 1,2}{50 \,.\, 16,7} \,.\, \frac{100}{2} = 10,8 \; V. = 2,7\,\%$$

der gesamten Spannung. Um daher diesen Verlust in Rechnung zu bringen, suchen wir in Kurve I die entsprechende Erregung für $1580 + 1580 \,.\, 0,027 = 1620 \; V.$ Es sind dies 10300 Ampère-Wicklungen. Nach Kurve IV bedürfen wir nun zur Erzeugung der gleichen Spannung 1616 V., jedoch mit Rücksicht auf die Armatur-Reaktion 2200 A.-W. mehr als vorhin.

Bedenken wir nun, dass die Versuchs-Dynamo 850 Windungen pro Magnet besass, so beträgt somit der durch die Magnete fliessende

Strom, der in diesem Falle auch gleich dem Armaturstrome ist, bei 12500 A.-W.

$$\frac{12500}{850} = 14{,}8 \text{ Ampère};$$

es ergäbe dies für die Armatur

$$\frac{14{,}8}{2} \cdot \frac{1100}{2} = \text{rund } 4000 \text{ A.-W.},$$

während wir auf der Armatur der neuen Maschine bei vollem Strom (100 A.)

$$\frac{300}{2} \cdot \frac{120}{2} = 9000 \text{ A.-W. haben.}$$

Für die neu zu bewickelnde Maschine wird daher pro Magnet eine Erregung von

$$\text{ca. } 10300 + 2200 \cdot \frac{9000}{4000} = 15300 \text{ A.-W.}$$

erforderlich sein.

Ich bemerke ausdrücklich, dass die voranstehende Rechnungs-Methode, wenn auch nicht auf mathematische Genauigkeit Anspruch machend, immerhin zu ziemlich genügenden Resultaten führt.

Beispiel 2. Eine vierpolige Trommel-Maschine mit glatter Armatur, Type analog Fig. 80, 81, von ca. 10 *PS* ergab, als Motor laufen gelassen, folgende Versuchs-Resultate:

Ampère-Windungen pro Magnetspule	Touren	Spannung an den Bürsten
2730	910	80 V.
3640	700	—
4550	580	—
5650	508	—
7300	425	—
8750	384	—
10000	364	—
10900	352	—

Bei diesem Versuch wurden die Magnete separat erregt; die Armatur konnte gewisser Umstände halber nicht belastet werden, bei andern Versuchen stellte es sich indessen heraus, dass die Armatur-Reaktion sehr gering war.

Daten der Maschine: $D = 300$; $N = 220$; Länge einer Windung $= 1100$ m/m.

Da die Maschine öfters für specielle Zwecke umgewickelt werden muss, stellen wir aus den obigen Versuchen ein für allemal die Charakteristik her, wobei wir statt der Spannung die nach Gleichung 5 ausgerechnete totale Induktion Φ setzen (siehe Fig. 70).

$$\Phi = \frac{E \,.\, 60 \,.\, 10^8}{n \,.\, N \,.\, p} = \frac{80 \,.\, 60 \,.\, 10^8}{n \,.\, 220 \,.\, 2} = \frac{1090000000}{n}.$$

Ampère-Windungen pro Magnetspule	Φ
2730	1,2. 10^6
3640	1,56. 10^6
4550	1,88. 10^6
5650	2,15. 10^6
7300	2,56. 10^6
8750	2,84. 10^6
10000	3,0. 10^6
10900	3,1. 10^6

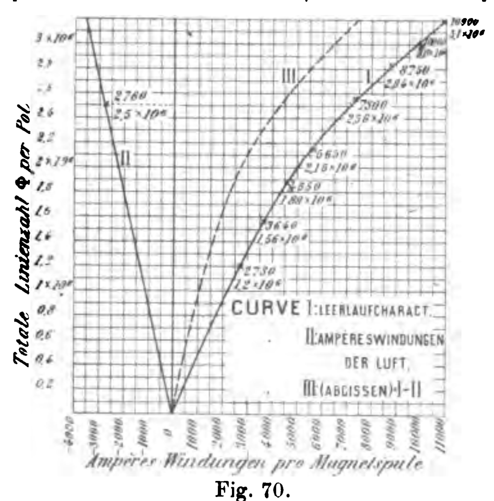


Fig. 70.

Gesetzten Falles, es wäre diese Maschine für eine Leistung von 65 Volt und 120 Ampère bei 600 Touren umzuwickeln, so verfolgen wir hier den gleichen schon oben angedeuteten Rechnungsgang. Vorausgesetzt, wir wollen in der Armatur eine Beanspruchung von 2,5 Amp. pro 1 $^m/_m{}^2$ Drahtfläche annehmen, so entspricht dies einem Drahtquerschnitt

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{120}{2,5} = 24 \ ^m/_m{}^2 \text{ oder } d = 5,5 \ ^m/_m \text{ (Tab. II).}$$

Isoliert können wir den Draht $= 6$ $^m/_m$ annehmen. Wir sehen nun nach, ob der dieser Beanspruchung entsprechende Volt-Verlust die zulässigen Grenzen, sagen wir nicht über 6 %, also ca. 3—4 V. nicht überschreite.

$$N = \frac{300 \cdot \pi}{6} = 157 \text{ oder rund } 150.$$

$$\text{Voltverlust} = \frac{120}{2} \cdot \frac{150}{2} \cdot \frac{1,1}{60 \cdot 24} = 3,4 \text{ Volt.}$$

Unsere Annahme war somit richtig. Wäre der Voltverlust zu gross, so würden wir natürlich etwas mit der Beanspruchung heruntergehen.

Da uns die Armatur-Reaktion dieser Maschine nicht genau zum voraus bekannt ist, wollen wir einmal nach den ungefähren Erfahrungen an ähnlichen Maschinen annehmen, die Spannung falle allein durch die Armatur-Reaktion bei Vollbeanspruchung um 3 Volt, so müssen wir folglich, um an den Bürsten der Maschine 65 Volt zu erhalten, die Maschine für eine interne Spannung von $(65 + 3,4 + 3)$ $= 71$ Volt erregen.

$$\Phi = \frac{60 \cdot 10^8 \cdot 71}{600 \cdot 150 \cdot 2} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Kraftlinien.}$$

Nach unserer Kurve I (Fig. 70) entspricht dies einer Erregung von rund 6000 A.-W. pro Magnetspule.

2. Ausbohrung der Magnetpole verschieden.

Es ist klar, dass die genannten Regeln zur Bestimmung der Magnetwicklung eben nur solange Gültigkeit besitzen, als der Abstand der Magnetpole vom Armatureisen in der Versuchs-Dynamo der gleiche ist, wie in der zu berechnenden Maschine, wie auch bei grösseren Maschinen mit ziemlich grossen Polschuhen, wenn die Abweichung von der Versuchsmaschine nicht erheblich ist (1—2 $^m/_m$ mehr oder weniger), letzteres überhaupt nur dann, wenn die Maschine relativ stark gesättigte Magnete hat, in welchem Falle natürlich die für das Magnetisieren der Schenkel allein benötigten Ampère-Windungen jene zur Überwindung des Luftwiderstandes bei weitem übertreffen (vergl. Abschnitt F, 2).

Da aber für jene Fälle, wo die Stromstärken beider Maschinen von einander stark variieren, auch die respektiven Armaturdrahtdicken ziemlich verschieden ausfallen, so wird der bei der Originalmaschine noch genügend grosse Spielraum für die umzuwickelnde Maschine vielleicht nicht mehr ausreichen und ein weiteres Ausbohren der Magnete notwendig sein. Umgekehrt kann die ursprüngliche Dynamo für eine sehr grosse Ampèrezahl berechnet sein und soll nun als Kraftübertragungs-Maschine mit hoher Spannung und niedriger Stromstärke, somit auch dünnen Drähten, benützt werden, was uns offenbar bestimmen würde, jenen Luftraum zu verkleinern.

Im Nachstehenden soll nun gezeigt werden, in welcher Weise die obigen Rechnungen auch für Maschinen mit verschiedenen Ausbohrungen durchzuführen sind.

Der Faktor $\mathfrak{J}m$ = Anzahl Ampère-Windungen auf dem Magneten setzt sich, wie wir später sehen werden, aus einzelnen Gliedern zusammen, entsprechend den verschiedenen Widerständen, welche die Kraftlinien beim Durchpassieren durch die Magnete, die Armatur und die Luftschicht zwischen Armatur und Magnet zu überwinden haben.

Speciell zur Überwindung des Luftwiderstandes bedürfen wir (Seite 142):

66. $K \cdot \frac{10}{4 \cdot \pi} 2\,\delta \cdot B_l$ Ampère-Windungen,

wo δ den Abstand der Magnetpole vom Armatureisen in cm, $B_l = \frac{\Phi}{S_l}$ die Anzahl Kraftlinien pro 1 cm² der Polschuhfläche und K einen Koefficienten bedeutet, der gewöhnlich zwischen 0,8—0,95 variiert und die bereits früher erwähnte, durch die Streuung an den Polen verursachte nützliche Querschnitts-Vergrösserung der Polflächen in Betracht zieht. Bei Armaturen mit ziemlich nahen Polspitzen kann im allgemeinen dieser nützlichen Streuung dadurch Rechnung getragen werden, dass man für S_l nahezu den ganzen auf einen Pol der Armatur entfallenden Teil der Armaturoberfläche einsetzt.

Die Gleichung 66 hat eine unverkennbare Ähnlichkeit mit dem Ohm'schen Gesetze. Die Grösse $\frac{2\,\delta}{S_l}$ bezeichnet nichts anderes als den Widerstand, den die Kraftlinien beim zweimaligen Überschreiten des Luftraumes zu überwinden haben. Nun findet aber, wie wir gesehen haben, eine gewisse Kraftlinienstreuung zu beiden Seiten der Pole statt, wodurch der Querschnitt der Luft, oder mit andern Worten die Leitungsfähigkeit dieses Teiles des Kraftlinienstromkreises, vergrössert wird. Denken wir uns nun die ganze Armaturoberfläche in kleine Teilstrecken von 1 cm Breite und der Länge der Armatur zerlegt, so lässt sich für jeden derselben der Widerstand oder besser die Leitungsfähigkeit nach der Formel berechnen

$$\text{Leitungsfähigkeit} = \frac{4\,\pi}{10} \cdot \frac{1 \times l}{2\,a}. \quad \text{(Siehe Fig. 71.)*)}$$

Die gesamte Leitungsfähigkeit oder der reciproke Wert des Gesamtwiderstandes des Streufeldes ist folglich gleich der Summe der einzelnen Leitungsfähigkeiten.

$$\frac{1}{\mathfrak{r}} = \frac{4\,\pi}{10}\,\frac{l}{2}\,\Sigma\,\frac{1}{a}, \text{ oder da}$$

*) In dieser Figur ist l_1, l_2, l_3 u. s. w. durch a_1, a_2, a_3 u. s. w. zu ersetzen.

$$K \frac{10}{4\pi} \frac{2\delta}{S_l} = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{2}{l} \frac{1}{\Sigma \frac{1}{a}} \text{ ist, und}$$

$S_l = b\,l$ gesetzt werden kann.

$$K = \frac{b}{\delta} \frac{1}{\Sigma \frac{1}{a}}.$$

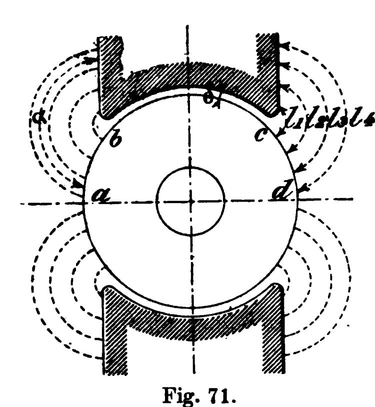


Fig. 71.

Berechnet man $\Sigma \frac{1}{a}$ von a bis b und c bis d, so lässt sich diese Gleichung auch schreiben:

$$67. \quad K = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{b} \Sigma \frac{1}{a}}.$$

Diese Werte sind in Tabelle IX am Schlusse des Buches annähernd ausgerechnet.

Beispiel 1. Zu berechnen ist K für eine Maschine, bei welcher die Pole $^2/_3$ des auf einen Pol entfallenden Umfanges der Armatur bedecken ($\beta = 0{,}67$), wenn $b = 35$ %m, $\delta = 1{,}5$ und $\alpha = 120^0$.

Diese Dimensionen sind nicht direkt in den Tabellen enthalten, dagegen liegt $\frac{1}{b} \Sigma \frac{1}{a}$.

Für $\beta = 07$, zwischen $0{,}12$ und $0{,}10$, im Mittel $= 0{,}115$ \
„ $\beta = 06$, „ $0{,}14$ „ $0{,}11$, „ „ $= 0{,}125$ } mittl. Wert $= 0{,}12$.

$$K = \frac{1}{1 + 1{,}5 \cdot 0{,}12} = 0{,}85.$$

Bedeutet $\mathfrak{J}m$ die Gesamtzahl der Ampère-Windungen, welche wir zur Erzeugung einer gewissen Anzahl Kraftlinien bedürfen, vorausgesetzt, dass bei dieser Maschine der Abstand der Polschuhe vom Armatureisen δ sei, so berechnet sich die totale Zahl aw für die gleiche Linienzahl, jedoch bei einer Luftdistanz δ_1 nach der Formel

$$(\mathfrak{J}m)' = \mathfrak{J}m - K \cdot \frac{10 \cdot 2}{4 \cdot \pi} \cdot \delta B_l + K \cdot \frac{10}{4 \cdot \pi} \cdot 2\,\delta_1 \cdot B_l \text{ oder}$$

$$68. \qquad (Jm)' = Jm - K \cdot 1{,}6 \cdot B_l\,(\delta - \delta_1).$$

Beispiele über die Umrechnung der Magnete für andere Bohrungen.

Beispiel I. Bei der in Beispiel 1 (S. 121) behandelten Maschine ist der Luftquerschnitt (aus den Dimensionen der Pole gemessen) $S_l = 3500$ $\%_m^2$; $\delta = 2{,}1$; $\delta_1 = 2{,}4$ (angenommen). Der von den Polen umfasste Bogen betrage 70 $\%_m$, $\beta = 0{,}87$, es wird daher nach Tab. IX

$$K = \frac{1}{1 + 2{,}4 \, . \, 0{,}04} = \text{ca. } 0{,}91.$$

Frage: Wie viel Ampère-Windungen bedürfen wir für die neue Maschine zur Erzeugung einer totalen Induktion von $12{,}5 \, . \, 10^6$ totale Kraftlinien pro Pol, ohne Berücksichtigung der Armatur-Reaktion?

$$B_l = \frac{12{,}5 \, . \, 10^6}{3500} = 3600.$$

Da in der Charakteristik, Fig. 69, statt der totalen Induktion die Spannung in Volt steht, müssen wir zuerst nachschauen, welche Spannung der obigen Induktion von $12{,}5 \, . \, 10^6$ Kraftlinien entspricht.

$$E = \frac{700 \, . \, 1100 \, . \, 12{,}5 \, . \, 10^6}{60 \, . \, 10^8} = 1600 \text{ Volt.}$$

Nach Kurve 69 I entspricht dies $10000 \; aw$; K soll für beide Ausbohrungen gleich angenommen werden.

$(Jm)' = 10000 - 0{,}91 \, . \, 1{,}6 \, . \, 3600 \, (2{,}1 - 2{,}4) = 11570 \; aw$ pro Magnetspule.

Wir haben hier insofern einen Fehler gemacht, dass wir K als konstant angenommen haben, während sich dasselbe mit der Ausbohrung ändert, es ist jedoch hinzuzufügen, dass der dadurch entstehende Fehler, solange die beiden Ausbohrungen nicht sehr verschieden sind, vernachlässigt werden darf. Übrigens liesse sich der Fehler fast ganz eliminieren, wenn man für δ in Gleichung 67 das arithmetische Mittel aus den beiden Luftdistanzen einsetzt.

Öfters scheint es wünschenswert, für die neue Maschine mit veränderter Ausbohrung nicht nur einige specielle Daten, sondern die ganze Charakteristik zu besitzen. Zu diesem Zwecke berechnet man den Faktor $K \, . \, 1{,}6 \, . \, B_l \, (\delta - \delta_1)$ für irgend ein beliebiges jedoch möglichst hohes B_l, trägt seinen Wert mit den entsprechenden Koordinaten auf und verbindet den so erhaltenen Punkt mit den Koordinaten-Nullpunkten. Ist $\delta > \delta_1$, so subtrahiert man die Abscissenwerte der so gebildeten Geraden von den Abscissen der

Kurve I; ist $\delta < \delta_1$, so addiert man diese Abscissen zur Kurve I, wodurch die neue Charakteristik erhalten wird.

Beispiel 2. Für die im Beispiele S. 125 behandelte 4polige Maschine ist $\delta = 1{,}6$ %m. Für die neue Maschine wollen wir $\delta_1 = 1{,}2$ %m annehmen, ferner ist $b = 16{,}5$; $\beta = 0{,}3$; $\alpha = 90^0$; $\frac{\delta + \delta_1}{2} = 1{,}45$; $K = \frac{1}{1 + 1{,}45 \,.\, 0{,}28} = 0{,}72.$
Für $\Phi = 2{,}5 \,.\, 10^6$ beispielsweise,

$$\text{oder } B_l = \frac{\Phi}{S_l} = \frac{2{,}5 \,.\, 10^6}{420} = 6000, \text{ wird somit}$$

$$K \,.\, 1{,}6 \,.\, B_l\,(\delta - \delta_1) = 0{,}72 \,.\, 1{,}6 \,.\, 6000\,(1{,}6 - 1{,}2) = 2760\; a\,w.$$

Diesen Wert tragen wir in Fig. 70 mit seinen entsprechenden Koordinaten auf und verbinden den Punkt mit dem Koordinaten-Anfangspunkt. Subtrahieren wir noch von sämtlichen Abscissenwerten der Kurve I die Abscissen dieser Geraden, so stellt die hieraus gebildete Kurve III die Charakteristik der mit neuer Ausbohrung versehenen Maschine dar.

Anmerkung. Das vorangegangene Beispiel hat ausschliesslich den Zweck, die Umrechnungsmethode zu illustrieren, im übrigen ist diese Maschine nicht als mustergültig zu betrachten.

Beispiel 3. Nicht selten wird dem Konstrukteur folgende Aufgabe gestellt: Ein Motor, der für eine bestimmte Tourenzahl berechnet war, läuft nach Versuch langsamer als gewünscht und muss nun auf die verlangte Tourenzahl gebracht werden. Ist die Differenz nicht sehr bedeutend und besitzt der fragliche Motor eine Nebenschlusswicklung, so ist die Lösung zum vorneherein gegeben: Man verringert die Induktion Φ durch eine entsprechende Ausbohrung. Bei einem Seriemotor sind zwei Wege möglich und man kann entweder einen Teil der Magnetwicklung abwickeln, oder die Pole grösser ausbohren, häufig auch werden beide Methoden gleichzeitig angewandt. Das Abwickeln allein hat insofern sein Bedenkliches, als daraus leicht Funkenbildung am Collector entstehen kann; grosse Ausbohrungen anderseits haben den Nachteil grösserer Streuung, vermindern im übrigen die Funkenbildung und Bürstenverschiebung. Die Berechnung der neuen Ausbohrung ist höchst einfach: Die Maschine wird versuchsweise als Motor mit der vorgeschriebenen Spannung und Armaturstromstärke laufen gelassen und die Erregung mittelst einem Widerstandsregulator (bei Nebenschlussmotoren in den Magnetstromkreis, bei Seriemotoren parallel zur Magnetwicklung zu schalten) so lange reguliert, bis die richtige Tourenzahl erreicht ist. Man erhält auf diese Weise zwei verschiedene Erregungen in *aw*, die erstere ohne Widerstand bei verminderter Tourenzahl, die zweite bei der richtigen Tourenzahl. Die Differenz muss durch Vergrösserung des Luftraumes amortisiert werden.

Es sei B_l die Luftsättigung für die normale Tourenzahl und $\mathfrak{J}m$ die aus dem Versuch erhaltene Differenz der aw beider Ablesungen (pro magnetischen Stromkreis), so ist die Vergrösserung der Ausbohrung

$$\delta = \frac{1}{2}\,\mathfrak{J}m\,\frac{4\pi}{10}\cdot\frac{1}{B},$$

d. h. der Durchmesser der Ausbohrung muss $2\,\delta$ grösser gemacht werden.

Soll gleichzeitig auch die Windungszahl (bei Seriemotoren) verringert werden, so ist für $\mathfrak{J}m$ derjenige Betrag einzusetzen, welcher durch Vergrösserung der Ausbohrung kompensiert werden soll.

F. Die Vorausberechnung der Magnetwicklung.

1. Einleitung. Die Zeit ist noch nicht allzuferne — vielleicht sind es 8 Jahre — wo man noch Dynamomaschinen nach dem Gefühle entwarf und die Taufe erst nach Ergebnis vollzog. Stimmte das Resultat, so war es gut, kam etwas anderes heraus, so war es meist nicht schwer, an Hand der Versuchsresultate die Wicklung derart zu modifizieren, dass das Resultat wenigstens nahezu erreicht wurde. Ganz natürlich war unter solchen Umständen die Fabrikation grösserer Maschinen stets eine riskierte Sache, die einer grössern Entwicklung elektrischer Kraft- und Lichtanlagen erschwerend im Wege stand. Heute ist dieser Bann gebrochen.

Die Berechnung grösserer Maschinen von über 1000 *PS* bietet relativ keine grössere Schwierigkeit mehr als diejenige einer 50 *PS* und lässt sich mit mindestens ebenso grosser Genauigkeit durchführen wie für eine Dampfmaschine oder Turbine.

Diese Errungenschaft verdanken wir ausschliesslich der Kenntnis der Magnetisierungsgesetze, an deren Ausbau die jedem Elektrotechniker bekannten Autoritäten Rowland, Lord Elphinstone, Bosanquet, Kapp, Forbes und last not least die Gebrüder Hopkinson thätig waren.

Wir können hier selbstverständlich nicht eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Theorien geben, sondern beschränken uns auf eine kurze Übersicht der wichtigsten Grundzüge derselben.

Rowland war der erste, der in seiner Abhandlung „on the permeability and the maximum of magnetismus of irion steel and cobalt“ (s. Phil. Mag., Serie iv., vol. X., August 1873) das Ohm'sche Gesetz auch auf magnetische Erscheinungen anwandte, und in der That ist eine gewisse Verwandtschaft in diesen Erscheinungen unverkennbar.

Bezeichnet nämlich

Φ die totale Zahl Kraftlinien, welche in einem geschlossenen magnetischen Stromkreise cirkulieren,

$\mathfrak{R}$ den Widerstand, der sich den magnetischen Kraftlinien entgegensetzt, und

M die magnetisierende Kraft = Stromstärke × Windungen,

so ist nach Rowland

$$\Phi = \frac{M}{\mathfrak{R}}.$$

Es ist dieses Gesetz insofern bedeutend zu nennen, als es eben die Grundlage bildet zu sämtlichen späteren Theorien. Anschliessend an Rowland führte Bosanquet für M die Bezeichnung „Magnetomotorische Kraft“, für $\mathfrak{R}$ „Magnetischer Widerstand“ ein. Er erweiterte das Rowland'sche Gesetz und machte es mehr für den praktischen Gebrauch geeignet. So setzte er für R die Summe der einzelnen in den verschiedenen Punkten eines geschlossenen magnetischen Stromkreises herrschenden magnetischen Widerstände ein (s. Phil. Mag., Juni 1884, p. 532, Electrician, Febr. 1885 u. s. w.).

Im Jahre 1884 brachte Rowland seine berühmte Abhandlung in der Konferenz zu Philadelphia vor, worin er eine Formel zur Berechnung der Kraftlinien in einem Magnete angab.

Es sei wiederum

Φ totale Zahl der Kraftlinien;

m Anzahl magnetisierender Windungen;

$\mathfrak{J}$ Strom in Ampère, der durch m fliesst;

L_e Eisenlänge der Magnete von Pol zu Pol;

S_e Querschnitt der Magnete;

μ magnetische Permeabilität (siehe Seite 2);
$L_l = 2\delta$ doppelter Abstand des Armatureisens von den Polen;
S_l Luftquerschnitt zwischen Armatur und den Polen;
S_l' Additions-Faktor, bedingt durch den Streuungsverlust an Kraftlinien beim Übergang aus den Polen in die Armatur.

$$\Phi = \frac{\frac{4\pi}{10} \mathfrak{J} m}{\frac{L_e}{\mu S_e} + \frac{L_l}{S_l + S_l'}}.$$

Genauere Angaben finden sich im Electrician vom 14. Febr. 1885.

Von weit grösserer Bedeutung für die Praxis waren die Arbeiten von Gisbert Kapp, erschienen im Electrician zwischen Februar 1886 und Mai 1887.

G. Kapp adoptierte zur Vereinfachung der Rechnung für die Kraftlinien eine Einheit (Englische Kraftlinie), die 6000 mal grösser ist als die CGS-Einheit. 1 englische Kraftline = 6000 CGS-Kraftlinien.

Dadurch würde Gleichung 5 zu

$$E = \Phi . N . n . p . 10^{-6}.$$

In dem Nachstehenden sollen indessen stets CGS-Kraftlinien vorausgesetzt sein.

Bezeichnet $\mathfrak{J}m$ die pro magnetischen Stromkreis notwendige Anzahl Ampère-Windungen, Φ wie früher die totale Zahl der von einem Pole ausgehenden Kraftlinien, so ist nach G. Kapp

$$\Phi = \frac{c . \mathfrak{J} m}{\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l},$$

wo $\mathfrak{R}_m$ den magnetischen Widerstand bedeutet, der sich den Kraftlinien beim Durchpassieren durch die Magnete entgegenstellt, $\mathfrak{R}_a$ den magnetischen Widerstand der Armatur, und $\mathfrak{R}_l$ den doppelten Widerstand der Luftschicht zwischen Armatureisen und Polschuhe; c ist eine Konstante.

Es bedeute ferner Φ' die Anzahl Kraftlinien, welche durch Streuung verloren gehen, indem sie, statt ihren Weg durch die

Armatur zu nehmen, einfach den kürzesten Weg von einem Pole zum andern einschlagen, und sozusagen einen „magnetischen Kurzschluss“ bilden. Wir müssen somit, um Φ effektive Kraftlinien in der Armatur zu erhalten, in den Magneten

$$\Phi'' = \Phi + \Phi' \text{ erzeugen.}$$

$$c\,(\mathfrak{J}m)' = (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l)\,\Phi.$$

$$\Phi' = \frac{(\mathfrak{J}m)'}{\mathfrak{R}_l'}\,.\,c.$$

$\mathfrak{R}_l'$ = mittlerer Widerstand, der sich den Kraftlinien für das direkte Überschreiten von einem Pole zum andern entgegenstellt.

$$c\,(\mathfrak{J}m)'' = \mathfrak{R}_m\,\Phi''.$$

$$\mathfrak{J}m = (\mathfrak{J}m)' + (\mathfrak{J}m)'', \text{ oder}$$

$$\mathfrak{J}m = \Phi\left[\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l + \frac{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l}{\mathfrak{R}_l'}\right]\frac{1}{c}.$$

Um den mit der Sättigung zunehmenden magnetischen Widerstand des Eisens zu berücksichtigen, stellte G. Kapp die Hypothese auf, das Wachsen dieser Widerstände vollziehe sich nach dem Gesetze der Tangente eines Bogens, der den Sättigungsgrad bedeute und bei 90° der vollständigen Sättigung entspricht.

$$R_m = \alpha\,.\,\frac{L_m}{S_m}\,.\,\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\,\sigma_m\right)}{\frac{\pi}{2}\,\sigma_m};$$

$$R_a = \beta\,.\,\frac{L_a}{S_a}\,.\,\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\,\sigma_a\right)}{\frac{\pi}{2}\,\sigma_a};$$

$$R_l = \gamma\,.\,\frac{2\,\delta}{S_l};$$

$$R_l' = \frac{1730}{\sqrt{D\,l}} \text{ für aufrechte Hufeisenmaschinen;}$$

$R_l' = \frac{1170}{\sqrt{Dl}}$ für umgekehrte Hufeisenmaschinen mit Fundationsplatte (Type Edison).

Worin $\sigma_m = \frac{B_m}{B_{m\,max}}$; $\sigma_a = \frac{B_a}{B_{a\,max}}$.

Nach **Kapp** ist $B_{max} = 16600$ für Gusseisen;
24000 „ Schmiedeisen.

L_m = Länge der Kraftlinien in den Magneten in $\%m$,
L_a = „ „ „ „ der Armatur in $\%m$,
L_l = doppelter Luftabstand in $\%m$,
S_m, S_a u. S_l = Querschnitte der Magnete, Armatur und Luft, in $\%m^2$.

} Siehe Figuren 74—81.

	Für Maschinen mit schmiedeisernen Magneten	Für Maschinen mit gusseisernen Magneten
c =	2400	2000
α =	2	3
β =	2	2
γ =	1440	1800

Tabelle der Tangenten-Funktion $\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma}$.

Linien pro $\%m^2$	Tangenten-Funktion Armatur	Tangenten-Funktion Magnet	Linien pro $\%m^2$	Tangenten-Funktion Armatur	Tangenten-Funktion Magnet
3000	1,01	1,01	14000	1,43	2,95
4000	1,02	1,05	15000	1,53	4,5
5000	1,03	1,09	16000	1,65	10,9
6000	1,05	1,13	17000	1,83	∾
7000	1,08	1,17	18000	2,04	
8000	1,11	1,25	19000	2,38	
9000	1,13	1,33	20000	2,85	
10000	1,17	1,47	21000	3,73	
11000	1,22	1,65	22000	5,27	
12000	1,27	1,89	23000	10,06	
13000	1,35	2,24	24000	∾	

Beispiel. Man bestimme die erforderliche Zahl Ampère-Windungen für eine Hufeisenmaschine (Type Edison, siehe Taf. II Fig. 2) mit folgenden Daten:

Magnete aus Schmiedeisen,

$E = 106$ (in der Leitung)

$J = 82$

$n = 360$

$N = 328$

$D = 25$

$l = 25.$

$L_m = 122;\quad S_m = 400;$

$L_a = 33;\quad S_a = 376;$

$L_l = 2,4;\quad S_l = 900.$

In der Armatur und in den Magneten sollen 15 Volt verloren gehen. Es wird daher:

$$\Phi = \frac{(106 + 15)\ 60\ .\ 10^8}{360\ .\ 328} = 6,1\ .\ 10^6;$$

$$B_m = \frac{6,1\ .\ 10^6}{400} = 15200;$$

$$B_a = \frac{6,1\ .\ 10^6}{376} = 16200;$$

$$B_l = \frac{6,1\ .\ 10^6}{900} = 6800;$$

$$R_l' = \frac{1170}{\sqrt{25\ .\ 25}} = 46,8.$$

Die Werte der Tangentenfunktion können mittelst Interpolation aus der Tab. Seite 137 bestimmt werden, da jedoch die Magnete ziemlich stark gesättigt sind, ist für diesen Teil eine genaue Berechnung der Funktion vorzuziehen.

$$\sigma_m = \frac{15200}{16600} = 0,915;$$

$$\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma_m\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma_m} = 5,22;$$

$$\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma_a\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma_a} = 1,69 \text{ (aus Tabelle Seite 137)}$$

$$\mathfrak{J}m = \frac{1}{2400}\left[\left(122 \, . \, 15200 \, . \, 2 \, . \, 5{,}22 + 33 \, . \, 16200 \, . \, 2 \, . \, 1{,}69 + 1440 \, . \, 2{,}4 \, . \, 6800\right)\right.$$

$$\left. + \left(33 \, . \, 16200 \, . \, 2 \, . \, 1{,}69 + 1440 \, . \, 2{,}4 \, . \, 6800\right) \frac{1}{46{,}8}\right] = 23000 \text{ A.-W.}$$

Diese Zahl stimmt ziemlich genau mit den Versuchsresultaten für stromlose Armatur überein (ca. 24000). Bei vollem Strom dagegen würde man mit 23000 A.-W. nur ca. 95 Volt erhalten.

Dieses Beispiel mag genügen.

Obwohl diese Kapp'schen Formeln längere Zeit sozusagen die einzigen waren, welche dem Dynamo-Konstrukteur für die approximative Vorausbestimmung seiner Maschinen zur Verfügung waren, so dürften sie heute wohl kaum mehr angewandt werden, weil die damit erhaltenen Resultate doch zu wenig Genauigkeit ergeben. Es kommt das daher, dass einmal der Verschiedenheit des Eisenmaterials keine Rechnung getragen ist, ferner sind die Koefficienten c und γ eigentümlicherweise als von der Art des Magnetmaterials abhängig angenommen, was augenscheinlich nicht zutrifft.

2. Die Hopkinson'sche Theorie (Electrician, November und Dezember 1886). Ein Eisenring von gleichmässigem Querschnitte S und einem Umfange L werde mit einer Anzahl m Windungen versehen (Fig. 72). Schickt man nun durch die Spule einen Strom, so werden in dem Ringe magnetische Kraftlinien erzeugt, deren Vorhandensein sich zwar durch keine äusserliche Erscheinung erkennbar macht, aber leicht dadurch konstatiert werden kann, dass man den Ring mit einer zweiten Spule, aus einer oder zwei Windungen bestehend, versieht, welche mit einem Galvanometer in Verbindung steht.

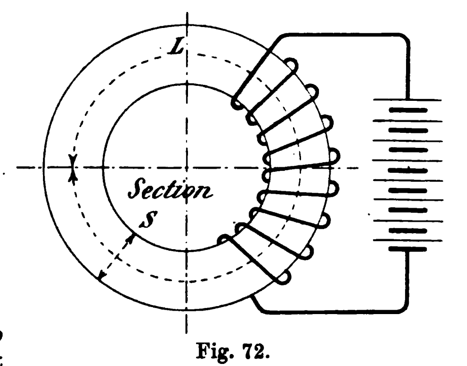


Fig. 72.

Wird der primäre Strom unterbrochen, so entsteht am Gal-

vanometer ein Ausschlag, der proportional der totalen Zahl Kraftlinien ist.

Wir können diesen Ringmagnet als nonpolaren Magnet bezeichnen, weil er keine ausgesprochenen Pole besitzt.

Die totale Induktion Φ hängt einesteils von der Zahl aw und anderseits vom magnetischen Widerstand ab, d. h.

$$\Phi = \frac{4\pi}{10} \cdot \mathfrak{J}m \cdot \frac{\mu S}{L}, \text{ oder}$$

$$\mathfrak{J}m = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{\Phi}{S\mu} \cdot L.$$

μ heisst die specifische magnetische Leitungsfähigkeit oder Permeabilität und ist daher

$$69. \qquad \mu = \frac{\Phi}{S} \cdot \frac{1}{\frac{4\pi}{10}\,\frac{\mathfrak{J}m}{L}} = \frac{B}{im} \cdot \frac{10}{4\pi}.$$

$$im = aw \text{ per } \%_m \text{ Länge.}$$

Über die Bestimmung von μ siehe Kapitel IV. Führt man die Messung über eine grosse Zahl verschiedener Stromstärken durch, so zeigt sich, dass μ nur im Anfang konstant ist und mit Zunahme der Sättigung rasch abnimmt. Die nachstehende Tabelle zeigt einige Werte von μ nach Versuchen von Dr. Hopkinson.

Der Ausdruck $\frac{4\pi}{10}\, im$ wird in den elektrischen Büchern fast allgemein mit H bezeichnet, folglich ist

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Mit Hülfe der nachstehenden Tabelle, die sich auf gewisse von Hopkinson untersuchte Eisensorten bezieht, und Gleichung 69 ist es ein Leichtes, die Zahl der aw zur Erreichung einer bestimmten magnetischen Intensität auszurechnen, sofern der Querschnitt überall der gleiche bleibt.

Tabelle der Werte von μ.

Ausgeglühtes Schmiedeisen		Graues Gusseisen	
B	μ	B	μ
4650	4650	3870	763
6200	3877	4650	756
7750	3031	6200	258
9300	2159	7750	114
10800	1921	9300	74
12400	1409	10800	40
14000	907		
15500	408		
17000	166		
18600	76		
20100	35		
21700	27		

Es sei beispielsweise die Länge eines schmiedeisernen Ringes = 21 cm. Um 18600 Kraftlinien pro cm² zu erzeugen, sind

$$\frac{18600}{\mu} \cdot \frac{10}{4\pi} = \frac{18600 \cdot 10}{76 \cdot 4\pi} = 196\ aw$$

pro cm Kraftlinienlänge notwendig oder total $21 \cdot 196$ = rund 4100.

Wir gehen zu einem allgemeineren Fall über, wo der Querschnitt des Magnetes sich ändert (Fig. 73). Für diese Anordnung ist der gesamte magnetische Widerstand gleich der Summe der einzelnen Widerstände der verschiedenen Teile, folglich ist

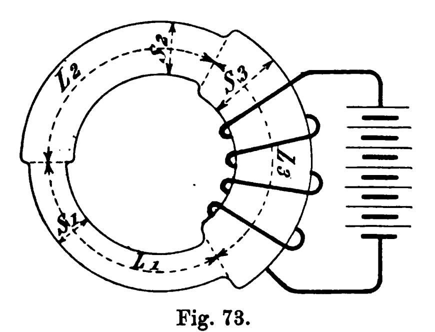


Fig. 73.

$$\mathfrak{J}m = \frac{10}{4\pi}\left(\frac{\Phi}{S_1\,\mu_1} \cdot L_1 + \frac{\Phi}{S_2\,\mu_2} \cdot L_2 + \frac{\Phi}{S_3\,\mu_3} \cdot L_3 \ldots\right).$$

Sind die einzelnen Teile noch aus verschiedenem Material, so ist μ jeweilig der entsprechenden Rubrik der Tabelle zu entnehmen.

Unterbricht man nun an beliebiger Stelle die Kontinuität des Eisens, so sind die Kraftlinien genötigt, ihren Weg durch den Luftzwischenraum zu nehmen; es bilden sich demgemäss zwei ausgesprochene Magnetpole, für deren Bestimmung die am Anfange des Buches gegebenen Stromregeln bestimmend sind. Der Magnetstromkreis erhält dadurch einen neuen additionellen Widerstand von der uns bereits bekannten Grösse

$$\mathfrak{R} = K \cdot \frac{L_l}{S_l} \cdot \frac{10}{4\pi}.$$

Die allgemeine Formel lautet daher, auf Dynamomaschinen angewandt:

$$70.\quad \mathfrak{J}m = \frac{10}{4\pi}\left[\left(\frac{\Phi}{S_a\,\mu_a}\right)L_a + \left(\frac{\nu\,\Phi}{S_m\,\mu_m}\right)L_m + \left(\frac{\nu'\,\Phi}{S_m'\,\mu_m'}\right)L_m' + \ldots\ldots \frac{K\,\Phi\,.\,L_l}{S_l}\right].$$

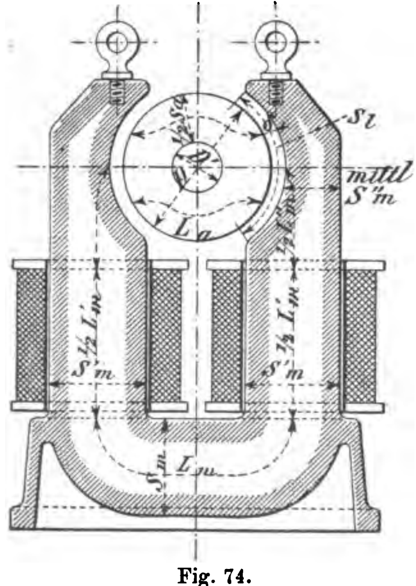


Fig. 74.

Wir gelangen hier unwillkürlich zur Einführung von Streuungs-Koefficienten. Die nämliche Streuung, welche wir an den Polen konstatiert haben, und die an dieser Stelle zur Verringerung des magnetischen Widerstandes beiträgt, macht sich nämlich in noch stärkerem Grade auf den übrigen Teilen des magnetischen Stromkreises bemerkbar und zwar ist hier deren Einfluss schädlich, indem die nicht durch die Armatur gehenden Linien verloren sind. Die nützliche Zahl Kraftlinien Φ muss daher mit einem Koefficienten ν

multipliziert werden, der grösser als „*1*“ ist und diesen Verlust in sich schliesst (siehe Fig. 84).

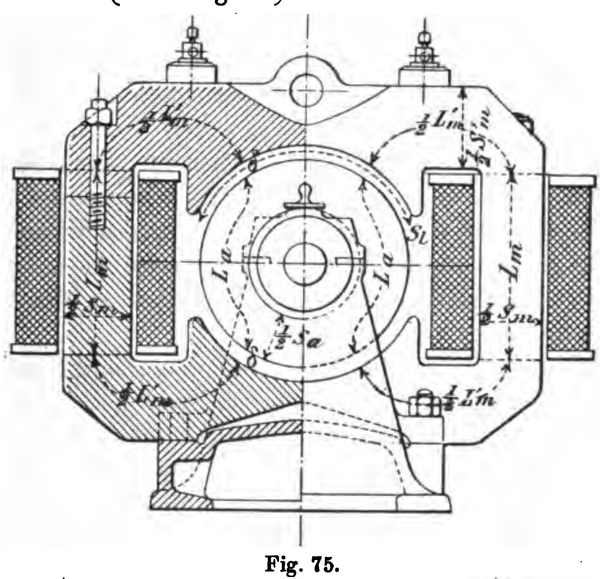


Fig. 75.

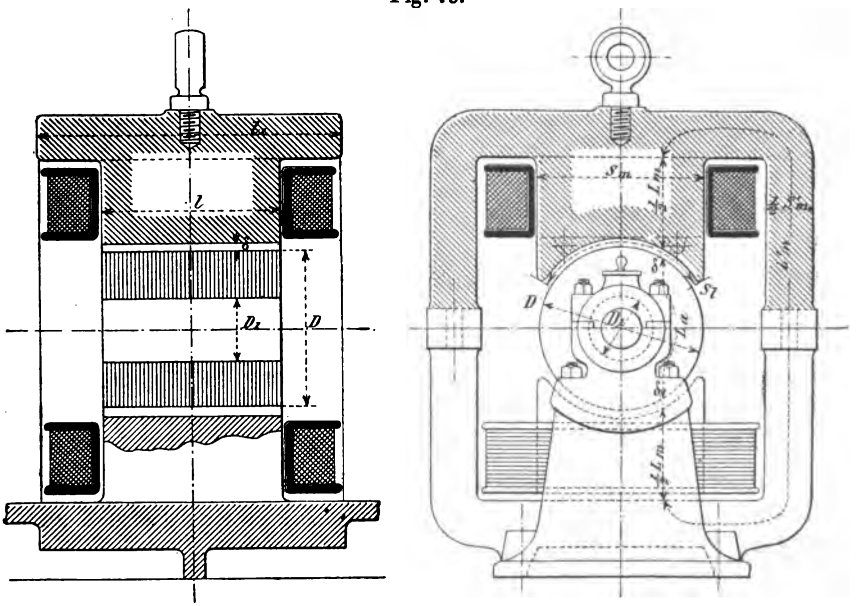


Fig. 76.

Die am Schlusse des Buches stehende Tab. X, welche wir einem Aufsatze von Ingenieur Wiener im Electrical Engineer 1894 entnehmen, enthält die Streuungskoefficienten ν für fast sämtliche der üblichen Dynamotypen. Diese Tabelle ist für den praktischen Gebrauch überaus bequem, doch muss sie mit Vorbehalt angewandt werden.

Sie bezieht sich offenbar auf Maschinen mit glatten Armaturen, bei welchen die Streuung grösser als bei Zackenarmaturen ist, denn im allgemeinen sind die angegebenen Streuungskoefficienten durchschnittlich grösser, als diejenigen, welche bisher in verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht wurden und Versuchen an Maschinen mit Zackenarmaturen entnommen sind.

Die Gleichung 70 enthält alle Grössen, welche zur Berechnung der $a\,w$ erforderlich sind. Hopkinson hat daran noch eine äusserst wichtige Umformung vorgenommen, welche das schnelle Rechnen in hohem Masse erleichtert, indem er die Quotienten

$$\left(\frac{\nu\,\Phi}{S\,\mu}\right) = f(\nu\,B)$$

in Form von Kurven aufstellte.

$$71.\quad \mathfrak{J}m = \frac{10}{4\,\pi}\Big(f(B_m)\,L_m + f(B_m)'\,L_m' + \ldots . \quad f(B_a)\,L_a + B_l\,.\,2\,\delta\Big).$$

In dieser Gleichung ist zu berücksichtigen, dass

$$B_l = K\,.\,\frac{\Phi}{S_l}\ \text{ist.}$$

Die angehängte lithographierte Tafel I enthält eine Zusammenstellung der Kurven von $f(B)$ für verschiedene Materialien, teils nach Angabe von Hopkinson, teils nach eigenen Versuchen des Verfassers u. s. w.

Um eventuellen Missverständnissen bezüglich der Bezeichnung „magnetische Stromkreise“ vorzubeugen, soll dieser Ausdruck an einigen Typen erlärt werden.

Fig.	74	75	76	77	78	79	80
Zahl der Magnetstromkreise .	1	2	2	4	4	—	1
Davon entfallen pro Pol . .	1	2	2	2	2	2	1

Da unter Φ immer die totale Zahl Kraftlinien pro Pol zu verstehen ist, so muss für S der Querschnitt sämtlicher Verzweigungen eingesetzt werden, welche nach dem gleichen Pole hin Kraftlinien schicken.

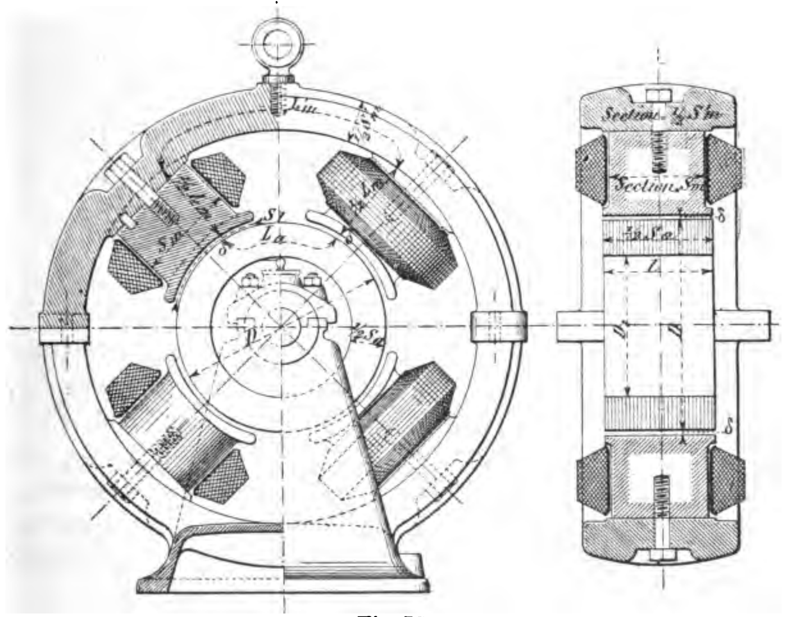


Fig. 77.

Anderseits ergibt die Gleichung 70, bezw. 71, wie übrigens auch die früher erwähnten Formeln von Kapp u. s. w., die Anzahl aw pro magnetischen Stromkreis; pro einzelne Spule entfallen daher

in Fig. 74	75	76	77	78	79	80	u. s. w.
$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	Ampère-Windungen.

Gleiche Armatur und Magnetsättigung vorausgesetzt, wird Type 74 etwas mehr Eisen und etwas weniger Kupfer als Type 75 erfordern.

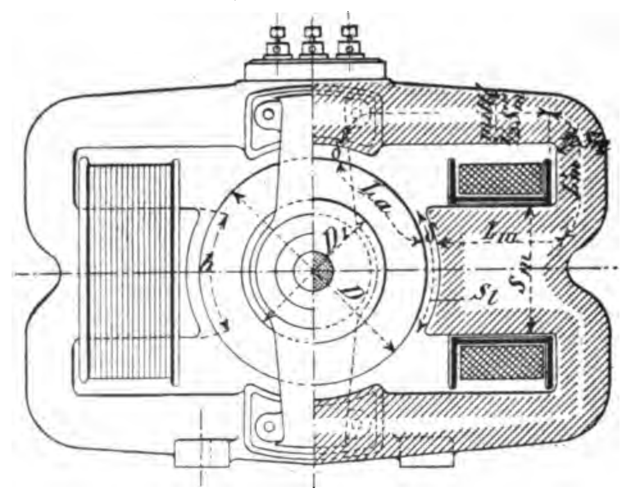


Fig. 78.

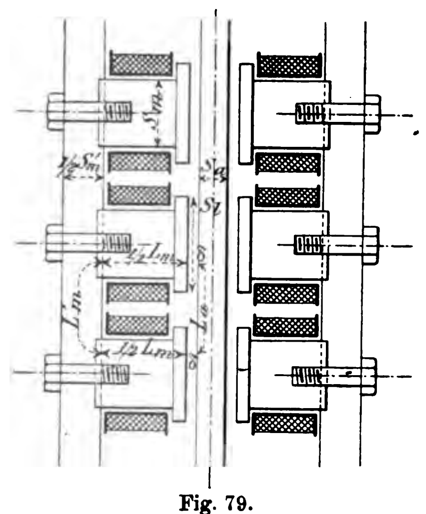


Fig. 79.

Type 75 und 76 dürften ungefähr gleich schwer werden, sowohl was Kupfer als Eisen anbelangt, vorausgesetzt, dass bei Type 76 nicht besondere Polschuhe angewandt werden, in welchem Falle an Kupfer gespart werden kann.

Type 78 fällt etwas leichter als Type 77 aus; bei Modell 80 ist das Gewicht noch geringer.

In der lithographierten Tafel II sind so ziemlich sämtliche charakteristischen Maschinentypen in systematischer (nicht

chronologischer) Reihenfolge und mit Angabe des ersten Konstrukteurs aufgeführt.

Wir können uns eine nähere Beschreibung erlassen, da sich perspektivische Zeichnungen derselben sozusagen in jedem Physikbuche vorfinden. Zu bemerken ist höchstens, dass die Modelle 13, 14, 18 und 22 (Tafel II) auch sehr häufig in Kastenform ausgeführt werden.

Bei einigen dieser Typen ist specielle Rücksicht auf möglichste Verminderung der Armaturreaktion getragen, auf welche in Kapitel VI näher eingetreten werden soll. Von diesem Gesichtspunkte aus sind beispielsweise die Maschinen Nr. 17, 27 und 30 entworfen worden, ferner die Maschinen von Couffinhal, von welcher sich eine Schnittzeichnung in Kapitel VIII befindet.

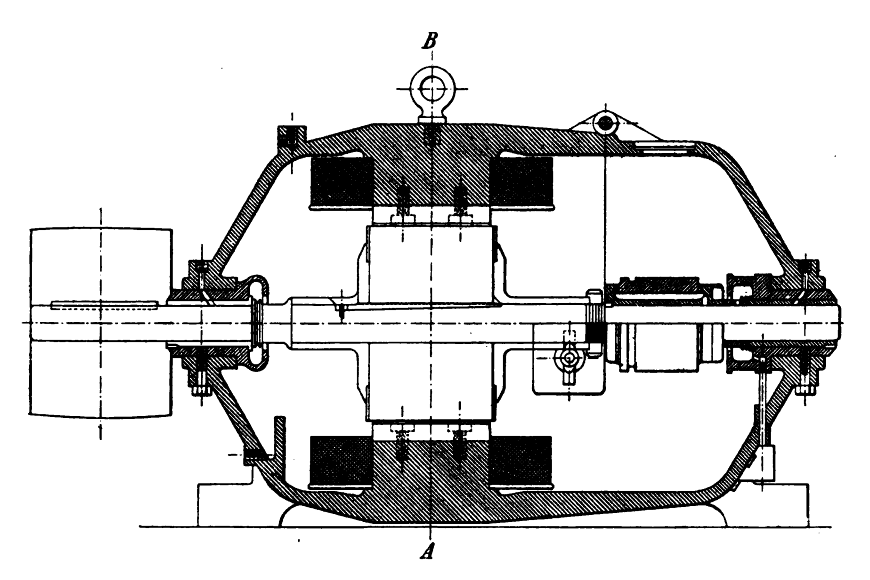


Fig. 80.

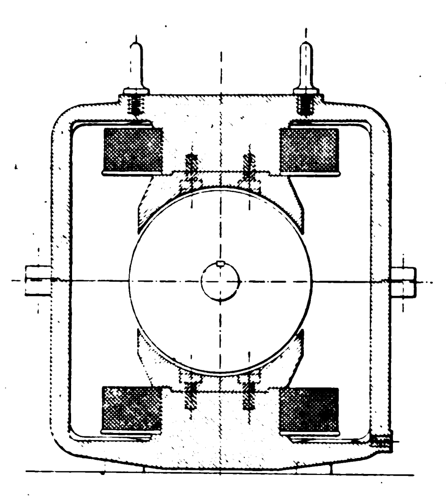


Fig. 81.

Bestimmung von δ und S für Zacken- und Locharmaturen.

Eine genaue Bestimmung des Luftabstandes δ für Zacken- und Locharmaturen hat insofern seine Schwierigkeit, als δ nicht nur von der Gestalt, Anzahl und Grösse der Zacken respektive Löcher abhängt, sondern auch in nicht geringem Masse durch den Sättigungsgrad des Armatureisens beeinflusst ist. Dass es so sein muss, geht aus einer einfachen Überlegung hervor: da

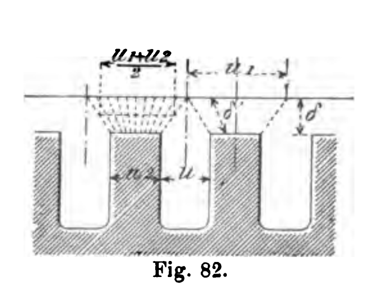


Fig. 82.

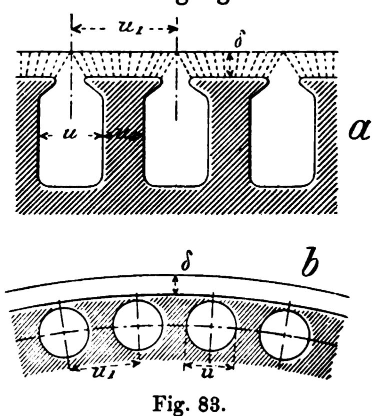


Fig. 83.

nämlich die Luft für das Durchpassieren der Kraftlinien je nach dem Sättigungsgrade einen ca. 200—1000 mal grösseren Widerstand darbietet, als das Armatureisen, so ist es einleuchtend, dass sich auch die Kraftlinien nicht gleichmässig am Umfange der Armatur verteilen, sondern in den Zacken konzentrieren, während zwischen den Zacken sozusagen gar keine Kraftlinien durchgehen.

Für gewöhnlich macht man bei Zackenarmaturen δ nicht unter

$$0{,}5 \text{ bis } 0{,}6\ (u) \text{ und}$$

$$u = 0{,}5\, u_1 \text{ (angenähert).}$$

In diesem Falle wird

$$\delta' = 1{,}1\ \delta \text{ und}$$

$$S_l' = \frac{u + u_2}{2\, u_1} \,.\, S_l = 0{,}75\, S_l.$$

Behält man in Gleichung 70 und 71 für δ den direkten Abstand bei und es sei

$$B_l = \frac{\Phi}{S_l} = \frac{\Phi}{b \,.\, l}$$

so muss das so erhaltene B_l mit $1{,}3$ bis $1{,}5\ B_l$ multipliziert werden.

Für halbgeschlossene Nuten wird es genügen, B_l' 15 — 20 % grösser anzusetzen, während bei Locharmaturen keine Kraftlinienkontraktion stattfindet.

Die letztere Maschinenart scheint übrigens in lezterer Zeit fast gänzlich aufgegeben worden zu sein.

Das Gleiche ist auch, zwar in bedeutend geringerem Masse, von der glatten Armatur der Fall, welche vorteilhaft durch Zackenarmaturen ersetzt wird.

Die Vorzüge der letzteren sind zweifacher Art:

1. grössere mechanische Festigkeit,
2. geringeres Kupfergewicht der Magnetwicklung.

Selbst dann, wenn die Nuten mit schlecht eingerichteten Fräsmaschinen hergestellt werden müssen, also verhältnismässig grosse Arbeitskosten veranlassen, stellen sich die Gesamtkosten nichts-

destoweniger etwas niedriger, als bei glatten Armaturen. Öfters ist auch die erstere Konstruktion aus mechanischen Gründen geboten. Bei Maschinen mit hohen Spannungen dagegen, die gewöhnlich als Grammering ausgeführt werden, treten die Vorteile der Kupferersparnis zurück gegenüber den mannigfaltigen Vorzügen der glatten Armatur — grössere Isolationsfähigkeit, kleinere Armaturreaktion, daher geringere Bürstenverschiebung, einfachere Konstruktion u. s. w.

Gezahnte Armaturen erhitzen sich leicht, wenn sie nicht sehr sorgfältig nach dem Fräsen nachgefeilt und verputzt werden.

Bestimmung des Streuungsverlustes.

Zum besseren Verständnis der erwähnten Streuungsverluste möge Fig. 84 dienen, wo die punktierten Linien die durch Streuung verloren gehenden Kraftlinien bedeuten.

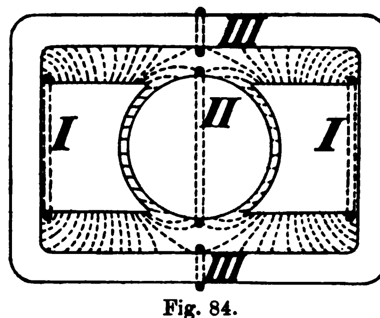


Fig. 84.

Es ist augenscheinlich, dass der Querschnitt I die grösste Zahl Kraftlinien umfasst, weil durch ihn überhaupt die gesamte Zahl derselben gehen muss. Dagegen nimmt dieselbe sowohl gegen die Armatur, als auch gegen die bei den Magnetbügel hin ab, weil sich unterwegs ein grosser Teil der Kraftlinien durch die Luft kurzschliessen.

Bedeutet daher Φ die aus den Polen noch in die Armatur übertretenden, also wirksamen Kraftlinien und x den Verlust vom Querschnitte I bis in die Armatur, so müssen wir folglich in I

$$\nu \Phi = \Phi \, . \, (1 + x) \text{ Kraftlinien erzeugen.}$$

Der Koefficient ν kann entweder durch Rechnung oder durch Versuch bestimmt werden.

Man bringt auf die Querschnitte I, II und III je eine Windung, die man auf die geeignete Weise abwechselnd durch ein ballistisches Galvanometer mit vorgeschaltetem Widerstand kurz-

schliessen kann. Die beiden Windungen III müssen natürlich hintereinander geschaltet werden. Hat man irgend eine der 3 Windungen mit dem Galvanometer verbunden, so erhält man durch plötzliches Unterbrechen des Magnetstromkreises oder durch Einschalten dieser Windungen einen Ausschlag, der proportional der Gesamtzahl der von der sekundären Windung geschnittenen Kraftlinien ist. Es seien $s\,I$, $s\,II$, $s\,III$ die jeweiligen Galvanometerausschläge, wobei man zweckmässigerweise jeden Versuch zweimal durchführt, indem man den Strom commutiert und für s den Abstand der beiden Umkehrungspunkte setzt.

Es ist dann

$$\text{für Querschnitt } I\colon \nu = \frac{s\,I}{s\,II};$$

$$\text{für Querschnitt } III\colon \nu = \frac{s\,III}{s\,II}.$$

Anmerkung. Der letzt erhaltene Wert von ν kann unter Umständen kleiner als 1 ausfallen, so dass es möglich ist, jenen Querschnitt entsprechend kleiner zu halten.

Führt man die gleichen Versuche auch für andere Querschnitte durch, so sieht man, dass sich der Koefficient ν stetig ändert, auch ist sein maximaler Wert für verschiedene Maschinen verschieden gross.

Nichtsdestoweniger kann man, ohne grosse Fehler zu machen, ν für eine gewisse Länge konstant annehmen. Man zerlegt dann den ganzen magnetischen Stromkreis in einzelne Teile, berechnet für jeden die theoretische Linienzahl B und multipliziert dieselbe mit den respektiven Koefficienten ν, ν', ν'' u. s. w., die natürlich nach den maximalen Werten schätzungsweise angenommen werden müssen.

Um den Streuungsverlust auf rechnerische Weise zu bestimmen, ist folgender Gang einzuschlagen.

Denken wir uns in a und b (Fig. 85) die Pole des Streuungsfeldes; Φ seien die nützlichen Linien, die zwischen $a\,\varrho\,b$ cirku-

lieren und $\nu\,\Phi$ die Linien zwischen a und b, die verlorenen Linien sind folglich gleich $(\nu - 1)\,\Phi$.

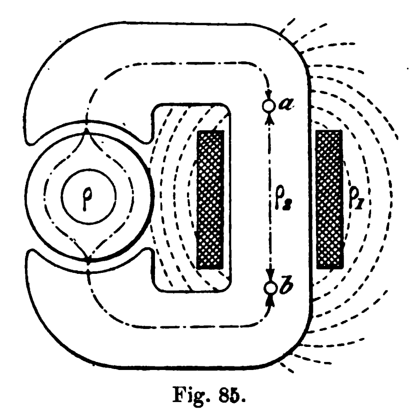


Fig. 85.

Mit $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{R}_1$ und $\mathfrak{R}_2$ sollen ferner die magnetischen Widerstände der einzelnen Stromkreise bezeichnet werden.

Für die Kraftlinien, welche durch die Armatur gehen, ist nach Früherem

$$\mathfrak{J}\,m = \mathfrak{R}\,\Phi + \mathfrak{R}_2\,(\Phi\,\nu).$$

Gleicherweise muss aber auch

$$\mathfrak{J}\,m = \mathfrak{R}_2\,(\Phi\,\nu) + \mathfrak{R}_1\,\Phi\,(\nu - 1) \text{ sein,}$$

da das Streuefeld mit der gleichen Zahl $a\,w$ erzeugt wird.

Durch Gleichsetzung folgt daher:

$$\mathfrak{R}_1\,\Phi\,(\nu - 1) = \mathfrak{R}\,\Phi \text{ oder}$$

72. $$\nu = \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{R}_1} + 1.$$

Man erhält hinreichend genaue Zahlen, wenn man für $\mathfrak{R}$ den blossen Luftwiderstand $\frac{2\,\delta}{S_l}\,.\,K$ einsetzt; für $\mathfrak{R}_1$ kann die Methode von Prof. Dr. Forbes (Journal Soc. Telegr. Eng. No. 64 und Electrician, Dez. 1886) benutzt werden.

Steht C_1, C_2, C_3 für die reciproken Werte der Widerstände der einzelnen Streufelder (deren Gesamtwiderstand gleich $\mathfrak{R}_1$ ist), so mag je nach Umständen zu deren Bestimmung eine der nachstehenden Formeln benutzt werden:

a) Zwischen 2 einander gegenüber liegenden, annähernd gleich grossen parallelen Oberfläche kann die magnetische Leitungsfähigkeit C_1 der Luft gleich der halben Summe der Oberfläche dividiert

durch die gegenseitige Distanz angenommen werden. (Die Masse sind in %m verstanden.)

$$73. \qquad C_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{AB + CD}{EF} \cdot a.$$

a = Höhe der Körper senkrecht zur Papierebene.

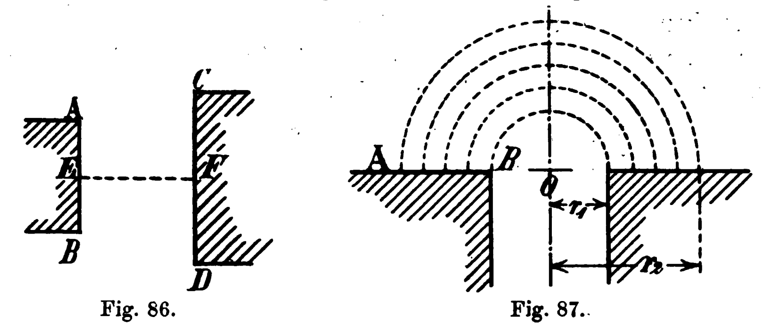


Fig. 86. Fig. 87.

b) Liegen die Oberflächen in einer Ebene (Fig. 87) und übersteigt ihre gegenseitige Distanz eine gewisse Grenze nicht, so gilt

$$74. \qquad C_2 = \frac{a}{\pi} \cdot Log_{nat.} \frac{r_2}{r_1} = 2{,}3 \cdot \frac{a}{\pi} \cdot log \frac{r_2}{r_1}.$$

$$r_2 = OA,$$
$$r_1 = OB.$$

c) Für jene Fälle, wo der Abstand jenen Grenzwert überschreitet (Fig. 88), gilt die Formel:

$$75. \qquad C_3 = \frac{a}{\pi} \cdot Log_{nat.} \frac{\pi \cdot AB + 2\,OA}{2\,OA} = 2{,}3 \cdot \frac{a}{\pi} log \frac{\pi\, AB + 2\,OA}{2\,OA}.$$

Totale Leitungsfähigkeit $C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{1}{\mathfrak{R}_1}$.

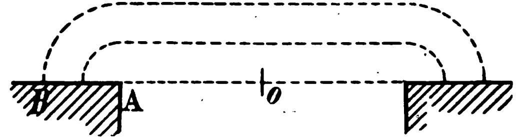


Fig. 88.

Die angegebenen 3 Berechnungsmethoden dürften so ziemlich für alle vorkommenden Fälle ausreichen. Bei Streuungen, welche sich durch die Magnetspulen hindurchpflanzen, ist zu beobachten, dass nur ein Teil der Windungen das Streufeld verursacht. Da eine genaue Berechnung in solchen Fällen ungemein kompliziert wäre, kann diesem Umstande dadurch Rechnung getragen werden, dass man die Leitungsfähigkeit dieses Zweiges nur halb so gross annimmt, als aus der Rechnung folgt.

Beispiel. Wir benutzen als Beispiel einen 2poligen Gleichstrommotor von *1,5 PS,* aufrechter Hufeisentype (Fig. 89).

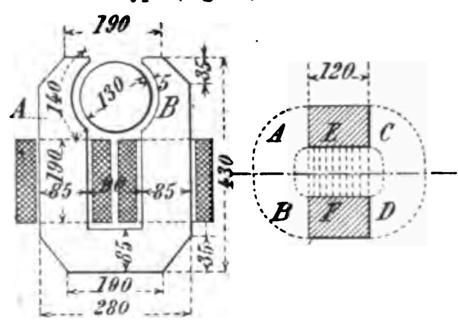


Fig. 89.

a) Streuung von A nach B und C nach D (Fall c) innerhalb der Spule.

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{19}{\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{\pi \cdot 8{,}5 + 2 \cdot 4{,}5}{2 \cdot 4{,}5} = \ldots \quad \mathbf{8{,}3}$$

b) Streuung von A nach B und C nach D (Fall c) oberhalb der Spule.

Approximativ ist

$$C_2 = 2 \cdot \frac{18}{\pi} \cdot 2{,}3 \log \frac{\pi \cdot 7 + 2 \cdot 7}{2 \cdot 7} = \ldots \ldots \quad \mathbf{10{,}8}$$

c) Streuung EF (Fall a) innerhalb der Spule.

$$C_3 = \frac{1}{2} \frac{12 \cdot 19}{9} = \ldots \ldots \ldots \quad \mathbf{12{,}7}$$

d) Streuung GH (Fall c).

$$C_4 = \frac{12}{\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{\pi \cdot 5 + 2 \cdot 4{,}5}{2 \cdot 4{,}5} = \ldots \ldots \quad \mathbf{3{,}8}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = \ldots \ldots \ldots \quad \mathbf{35{,}6}$$

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{1}{35{,}6} \cdot \frac{10}{4\,\pi}.$$

Mit Berücksichtigung des Eisenwiderstandes (8000 Linien im Gusseisen, μ = ca. *100*) findet man

$$R = \frac{10}{4\,\pi}\left(\frac{1}{14 \,.\, 12} + \frac{2 \,.\, 15}{8{,}5 \,.\, 12 \,.\, 100}\right) = \frac{10}{4\,\pi} \,.\, 0{,}009.$$

$$\nu = 1 + \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{R}_1} = 1 + 0{,}009 \,.\, 35{,}6 = \mathbf{1{,}32}.$$

Man sieht aus dem einen Beispiele, dass der individuellen Auffassung des Konstrukteurs mehr oder weniger Freiheit gelassen ist, das Resultat hängt dementsprechend auch davon ab.

Anmerkung. Um die Rechnung nicht allzusehr zu komplizieren, ist es eine allgemeine Regel, dass man den maximalen Streuungskoefficienten nur für die Länge des Kraftlinienkreises anwendet, der von den Magnetspulen bedeckt ist und auf dem übrigen Teil die Streuung vernachlässigt.

Beispiele über die Hopkinson'sche Methode zur Bestimmung der Ampère-Windungen.

Bei allen ähnlichen Berechnungen wird man sich mit Vorteil einer gewissen schematischen Reihenfolge (siehe übrigens Kap. X) bedienen, welche die nachträgliche Kontrolle sehr erleichtert.

Beispiel 1. Berechnung einer „Manchester"-Dynamo (Fig. 75) mit Seriewicklung für folgende Angaben:

Bürstenspannung E	= *1800* Volt,
Stromstärke J	= *24* Ampère,
Tourenzahl n	= *700*,
Spannungsabfall	= 5 %,
Drähte auf der Armatur N	= *1100*.

Wir benutzen die Gleichungen 5 und 71; die Grössen $f(\nu B)$ sollen ferner den Kurven I und V, Tafel I, entnommen werden.

$$\Phi = \frac{1{,}05 \,.\, 1800 \,.\, 60 \,.\, 10^3}{700 \,.\, 1100} = 14700000.$$

Specifikation	Sektion $\%_m^2$	ν (angenommen)	νB	$\frac{10}{4\pi} f(\nu B)$	L $\%_m$	aw
Magnete (unter den Spulen), Gusseisen . .	$S_m = 1800$	1,4	11400	250	$L_m = 35$	8750
dto. Polstücke . . .	$S_m' = 2000$	1	7350	50	$L_m' = 96$	4800
Armatur	$S_a = 900$	1	16300	40	$L_a = 46$	1840
Luft	$S_l = 3500$	$K = 0,87$	3660	2920	$L_l = 2 \times 1$	5840
Totale Zahl aw pro magnetischer Stromkreis						21230

$$\text{Windungen pro Spule} = \frac{21230}{24} = 885$$

gegenüber *850* bei Versuch.

Beispiel 2. Berechnung einer 2poligen Dynamo (Fig. 76) mit Zackenarmatur.

Bürstenspannung $E = 125$ Volt,
Stromstärke $J = 60$ Amp.
Tourenzahl $n = 1100$,
$N = 240$,
Spannungsabfall $= 5\,\% = 6,2$ Volt ($2,5\,\%$ Ohmscher Verlust).

$$\Phi = \frac{1,04 \,.\, 125 \,.\, 60 \,.\, 10^8}{1100 \,.\, 240} = 3000000.$$

Specifikation	Sektion $\%_m^2$	ν angenommen	νB	$\frac{10}{4\pi} f(\nu B)$	L $\%_m$	aw
Magnet (unter den Spulen), Gusseisen . .	$S_m = 415$	1,22	8850	86	$L_m = 26$	2240
dto. Bügel, Gusseisen .	$S_m' = 470$	1	6400	35	$L_m' = 90$	3150
Armatur	$S_a = 220$	1	13600	12	$L_a = 23$	276
Luft	$S_l = 425$	$1,4 \,.\, 0,86$	8500	6800	$L_l = 2 \times 0,4$	5450
Totale Zahl aw pro magnetischer Stromkreis						11116

Hievon entfallen pro Spule 5558.

Nach Versuch waren bei Volllast 11200 Ampère-Windungen erforderlich.

Berechnung der Shuntwicklung: Länge einer Windung $\mathfrak{L} = 1,02$ $^m\!/$.

Nach Gleichung 54 ist

$$s = \frac{\mathfrak{J}m \,.\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50} = \frac{5558 \,.\, 2 \,.\, 1,02}{125 \,.\, 50} = 1,82 \ {}^m\!/_m{}^2, \text{ Drahtdicke} = 1,5 \ {}^m\!/_m.$$

Bei 5,5 % Stromverlust ergibt dies nach Gleichung 56

$$m = \frac{\mathfrak{J} m}{\varepsilon \, . \, J} = \frac{5558}{0{,}055 \, . \, 60} = 1680 \text{ Windungen pro Spule.}$$

Beispiel 3. Berechnung eines 2poligen „Kasten"-Motors aus Stahlguss, Type Sayers (Fig. 80 und 81). Ungefährer Masstab 1 : 12,5. Die nachstehenden Zahlen sind dem Electrician, 10. Januar 1896, entnommen.

Spannung *122* Volt
Stromstärke *104* Amp. } Totales Motorgewicht *835* kg.
Touren *775*

Armatur: Hauptwicklung *42* Abteilungen à *4* Drähten,
Kompensationswicklung (S. 36) *42* Abteilungen à *4* Drähten,
Draht der Hauptwicklung *14* m/m^2,
Totale Drahtlänge *115* m,
Widerstand von Bürste zu Bürste *0,0385* Ω bei *50*° C.

Magnete (Shunt): 2 Spulen, wovon
eine mit *1500* Windungen aus Draht von *1,4* und
" " *1850* " " " " *1,2* m/m.
Widerstand in Serie *53* Ω bei *55*° C.

Spannungsverlust = *104* . *0,0385* = *4* Volt,
Zuschlag für Armaturreaktien u. Gegenwirkung der Kompoundwicklung = *9* "
13 Volt.

$$\Phi = \frac{(122 - 13) \, . \, 60 \, . \, 10^3}{775 \, . \, 168} = 5000000.$$

Specifikation	Sektion c/m^2	ν (angenommen)	νB	$\frac{10}{4\pi} \times f(\nu B)$	L c/m	$a w$
Magnete (unter den Spulen) Stahlguss . . .	393	1,1	13800	20	24	480
dto. äuss. Kastenwand .	425	1	11800	11	90	990
Armatureisen	384	1	13000	9,6	30	288
Armaturzacken . . .	285	1	17500	96	4,75	456
Luft	634	1,3 . 0,95	9750	7800	0,76	5930
Totale Zahl $a w$ pro magnetischer Stromkreis						8144

$$\text{Vorhanden waren } \frac{122}{53} \, . \, 3350 = 7700.$$

IV. Experimentelle Bestimmung der Permeabilität.

Der ursprüngliche Hopkinson'sche Apparat zur Prüfung der Permeabilität findet sich in jedem Lehrbuche der Elektricität aufgezeichnet. Da er sich weniger für den praktischen Gebrauch eignet, soll hier eine ebenfalls sehr bekannte einfachere Einrichtung desselben besprochen werden.

Das zu prüfende Eisenstück (Gusseisen oder Schmiedeisen u. s. w.) hat die in Fig. 90 ersichtliche Form. Um richtige Messungen machen zu können, muss der Querschnitt der beiden magnetischen Stromkreise überall der gleiche sein, ferner darf die Distanz zwischen zwei Schenkeln wegen der Streuung nicht zu klein gewählt werden. Auf dem mittleren Schenkel sind 2 Spulen angebracht, eine grosse I mit möglichst viel Windungen und eine kleine II bestehend aus 2 bis 3 Windungen. Die Zahl der Windungen der Spule I richtet sich übrigens nach der Länge L der Kraftlinien und der Stromstärke.

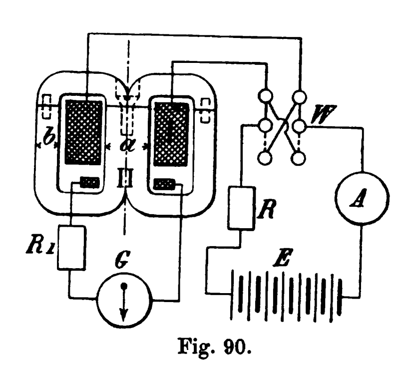


Fig. 90.

Ist L beispielsweise $= 50$ %m und es seien noch Messungen bis 19000 Linien bei Stahlguss auszuführen, so wären hiefür ganz approximativ ca 240 aw pro %m Länge oder

$$\text{total } 240 \times 50 = 12000 \; aw$$

erforderlich; beträgt der Strom 80 Ampère, so erhält Spule *I* folglich $\frac{12000}{80} = 150$ Windungen.

Der Widerstand R dient zur Änderung der Errregerstromstärke, die an dem Ampèremeter A abgelesen werden kann. G ist ein ballistisches Galvanometer, das auf die untenstehende Weise mittelst eines Kondensators auf bestimmte Elektricitätsmengen kalibriert wird.

Die Messung der Kraftlinien für eine gegebene Elektricitätsmenge wird auf die Weise vorgenommen, dass man den Erregerstrom durch die Wippe W rasch commutiert; der Widerstand R_1 wird hiebei zur Regulierung des Galvanometerausschlages benutzt.

Bezeichnet Φ die gesamte Zahl Kraftlinien, welche durch den Querschnitt a gehen, so findet durch die Stromumkehrung in der Spule *II* eine Kraftlinienänderung $= + \Phi - (-\Phi) = 2\,\Phi$ statt.

Die entsprechende Elektricitätsmenge ist daher

$$Q = \frac{2m \,.\, \Phi}{R_1}.$$

m = Anzahl Windungen der kleinen Spule;
R_1 = totaler Widerstand des Galvanometerstromkreises, d. h. Zusatzwiderstand + Widerstand der Spule *II* + Widerstand des Galvanometers in *CGS*-Einheiten.

Da die Ablenkungen proportional den Elektricitätsmengen sind, so folgt aus der Ablenkung d und derjenigen von d_1 bei der bekannten Elektricitätsmenge Q_1 des Kondensators

$$Q = Q_1 \,.\, \frac{d}{d_1}, \text{ oder}$$

76. $$\Phi = Q_1 \,.\, \frac{d}{d_1} \,.\, \frac{R_1}{2m}.$$

Kalibrierung des Galvanometers Fig. 91. Mittelst des Sabine'schen Schlüssels U wird der Kondensator zunächst von der Batterie A aus geladen und dann auf das Galvanometer G entladen.

E = Spannung der Batterie in Volt (es genügt übrigens hiefür ein einzelnes Element, dessen Spannung genau bekannt ist),

C = Kapacität des Kondensators in Mikrofarad.

77. $$Q_1 = E \cdot C \cdot 10^{-7} \quad CGS\text{-Einheiten.}$$

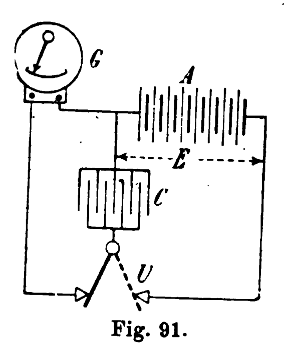


Fig. 91.

Bezüglich der Ablenkung d und d_1 ist noch zu bemerken, dass für genaue Messungen nicht der erste Ausschlag in die Rechnung eingesetzt werden darf; es müssen vielmehr zwei aufeinander folgende Ablenkungen d_1' und d_1'' beobachtet werden, woraus

78. $$d_1 = 1{,}25\, d_1' - 0{,}25\, d_1''$$

berechnet wird.

Permeabilitätsprüfungsapparat des Verfassers. Die bekannten Apparate zur Prüfung des Eisens besitzen fast ohne Ausnahme den grossen Nachteil, dass sie gegen äussere magnetische Einflüsse sehr empfindlich sind und deshalb in einem von Eisen freien Raume untergebracht werden müssen. Wenn diese Bedingung schon im allgemeinen ziemlich schwer zu erreichen ist, so dürfte dies in einer Maschinenfabrik, wo sozusagen der letzte Winkel mit Eisen angefüllt ist, rein unmöglich sein. Der Hauptnachteil der meisten dieser Laboratoriumsapparate besteht aber insbesondere darin, dass die zur Prüfung verwendeten Echantillons von relativ grosser Länge sein müssen. Für genaue Messungen ist es nun unerlässlich, dass diese Probestücke aus dem massiven Eisenstück, das zur Verwendung kommen soll, herausgeschnitten werden, weil man nur unter dieser Bedingung sicher ist, dass die magnetischen Eigenschaften genau die gleichen sind. Separat gegossene Stäbe haben z. B. eine ganz andere Struktur, als massive Gussklötze, ferner sind sie härter, weil sie sich schneller abkühlen; notwendigerweise ändert sich dadurch auch die magnetische Leitungsfähigkeit.

Der Verfasser hat daher einen Apparat konstruiert*), zu welchem Stäbe von nur 80 m/m Länge und 5 c/m² Querschnitt erforderlich sind und bei einer für praktische Zwecke vollständig genügenden Genauigkeit den Vorteil äusserst einfacher und schneller Handhabung besitzt. (Zur Messung einer vollständigen Sättigungskurve sind kaum 5 Minuten erforderlich.)

Derselbe beruht auf dem Prinzipe der magnetischen Wage.

Nach Maxwell beträgt die Zugkraft, welche ein Magnet vom Querschnitte S und der Liniendichte B ausüben kann

$$79.\quad Z = \frac{B^2 \,.\, S}{981 \,.\, 8\,\pi \,.\, 1000}\ \text{kg} = \text{rund}\ \frac{B^2 \,.\, S}{25000000}$$

$$80.\quad B = \sqrt{\frac{Z \,.\, 8\,\pi \,.\, 981000}{S}}\ \text{oder}\ B = 5000\sqrt{\frac{Z}{S}}.$$

Wenn also Z bekannt ist, so kann mit Hülfe von Gleichung 80 B ausgerechnet werden.

Tabelle von B und Z für einen Probestab von 25 m/m Durchmesser.

B	Z in kg	B	Z in kg	B	Z in kg	B	Z in kg
500	0,05	5500	6,05	10500	22,0	15500	48,0
1000	0,20	6000	7,20	11000	24,2	16000	51,2
1500	0,45	6500	8,45	11500	26,4	16500	54,5
2000	0,80	7000	9,80	12000	28,8	17000	57,8
2500	1,25	7500	11,22	12500	31,3	17500	61,3
3000	1,80	8000	12,80	13000	33,8	18000	64,9
3500	2,45	8500	14,50	13500	36,4	18500	68,5
4000	3,20	9000	16,20	14000	39,2	19000	72,3
4500	4,05	9500	18,00	14500	42,0	19500	76,0
5000	5,00	10000	20,00	15000	45,0	20000	80,0

*) Solche Apparate sind in der Maschinenfabrik Oerlikon, bei J. Farcot in Paris und im Arsenale des Österreichischen Lloyd in Triest im Gebrauch.

Die Konstruktion des Apparates ist aus der Zeichnung 92 ersichtlich, Fig. 93 gibt die äussere Ansicht und die Art und Weise der Aufstellung.

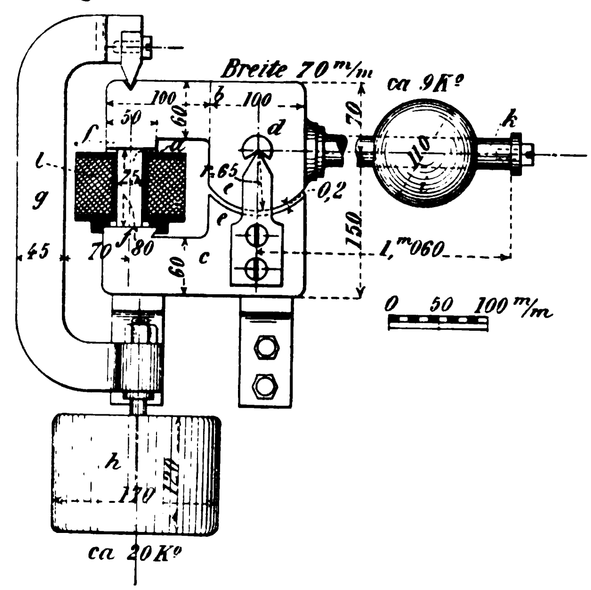


Fig. 92.

a ist das zu prüfende Eisenstück, über welches die Magnetspule gesteckt wird; die Bügel *b* und *c* von bedeutend grösserem Querschnitt bilden mit *a* zusammen den vollständigen magnetischen Stromkreis. Das obere Stück *b* ist auf 2 Schneiden *d* ruhend und drehbar, so dass die runden Polflächen *e e* für irgendwelche Lage vollständig gleichen, möglichst geringen Abstand haben. Die Fläche *f*, wie auch die Endflächen der Echantillons, müssen selbstverständlich genau eingeschliffen werden. Um das zu erleichtern, ist die Spule auf einem Schlitten angebracht, welcher erlaubt, dieselbe seitlich zu verschieben. Der Bügel *g* dient zur Erhaltung des Gleichgewichtes, wie auch zur Kalibrierung des Hebels *k*.

Kalibrierung des Apparates. Man sucht vorerst den Nullpunkt, indem man das Gewicht *i* soweit nach dem Aufhänge-

punkt hinschiebt, bis vollständiges Gleichgewicht hergestellt ist. Die betreffende Stelle wird durch einen senkrechten Strich markiert.

Durch successives Anhängen der in den obigen Tabellen für die verschiedenen B angegebenen Gewichte Z an den Bügel g und Verschieben des Gewichtes i werden jeweilig die Gleichgewichtslagen aufgesucht und durch senkrechte Striche bezeichnet.

Ein letzter Skalastrich bedeutet die Kraftliniendichte bei abgenommenem Bügel. Es muss in diesem Falle bei der Berechnung von B zu Z noch das Gewicht des Bügels addiert werden. Wir vermeiden auf diese Weise eine allzu grosse Belastung der Schneiden, sowie eine zu lange Stange.

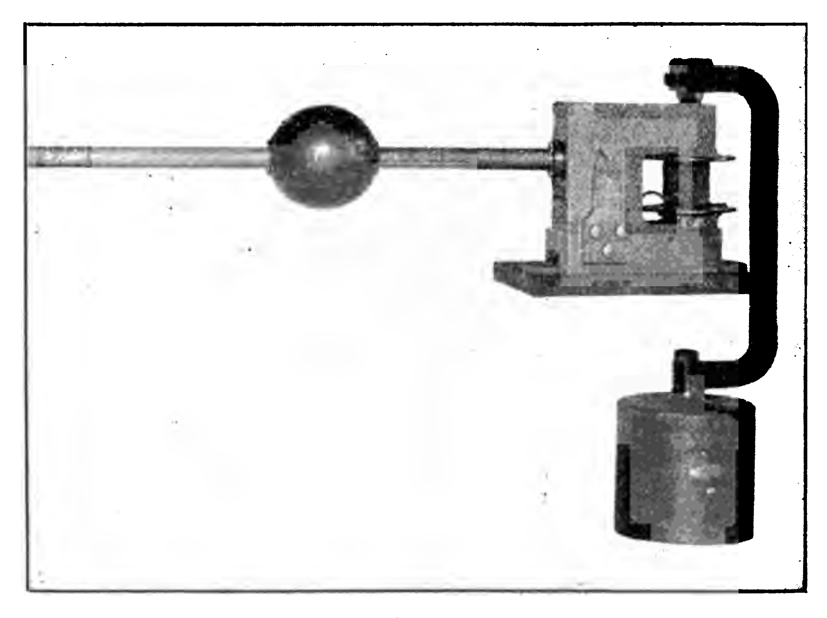


Fig. 93.

Selbstredend hat man den Apparat bei dieser Messung absolut horizontal aufzustellen, weil nur unter dieser Bedingung genaue Resultate erreichbar sind.

Hat man öfters derartige Messungen zu machen, so ist es anzuraten, das Ampèremeter des Erregerstromes mit einer Skala

zu versehen, welche statt Ampère direkt die *a w* pro %m Kraftlinienlänge $(= \frac{1}{8}$ *a w* total) anzeigt.

Soll nun ein Stab untersucht werden, so wird in der Weise vorgegangen, dass man das Gewicht *i* auf eine bestimmte Linienzahl einstellt (der Bügel *g* bleibt dabei angehängt) und mittelst eines kleinen Rheostaten die Erregerstromstärke bis zum Abreissen vermindert; man kann aber auch den Strom konstant halten und das Gleichgewicht durch sanfte, drehende Bewegung so lange verschieben, bis der Anker abgerissen wird.

Korrektion der Versuchsresultate. Während bei höheren Sättigungsgraden der Widerstand des Bügels und der Übergangswiderstand an den Passflächen *e e* vernachlässigt werden kann, bedürfen die Ablesungen von niedrigen Sättigungsgraden, insbesondere bei Messungen von Schmiedeisen und Stahl, einer kleinen Korrektion.

Für die angegebenen Dimensionen sind nämlich zur Überwindung des magnetischen Widerstandes im Bügel und in der Luft, sowie der Übergangswiderstände an den Endflächen des Probestabes

$$\text{ca. } \frac{1,8}{1000} \cdot B + \frac{0,9}{1000} B \; a w$$

nötig oder per %m Stablänge berechnet

$$\frac{0,22\, B}{1000} + \frac{0,116\, B}{1000}.$$

Das erste Glied berücksichtigt den Widerstand im Eisen, das letztere denjenigen der Luft (0,2 m/m).

Die Messungen sind, wie bereits bemerkt, für praktische Zwecke vollständig genau genug. Selbst dann, wenn man den Korrektionswiderstand doppelt zu gross oder zu klein annimmt, beträgt der grösste mögliche Fehler bei Schmiedeisen bis zu 10000 Linien kaum 20 %, bei grösseren Sättigungen verschwindet er dagegen vollständig.

V. Lösung einiger praktischer Fragen *)

über

Gleichstrommaschinen auf graphischem Wege.

Das graphische Verfahren hat bisher auf die Berechnung elektrischer Gleichstrommaschinen so wenig Anwendung gefunden, dass es füglich überraschen muss, und zwar um so mehr, wenn man bedenkt, dass es bis zur Stunde überhaupt noch keine Methode gibt, welche mit vollständiger Umgehung graphischer Hülfsmittel die Verhältnisse einer Maschine auf rechnerischem Wege zu bestimmen gestattet.

Der Grund hierfür mag teilweise in dem Umstande zu suchen sein, dass die Vorzüge des graphischen Verfahrens noch viel zu wenig bekannt sind. Meines Wissens hat Picou zum ersten Male in seinem Buche „Machines Dynamo-électriques" diese Methode in praktisch verwendbarer Form dargestellt.

Es sollen deshalb in Nachstehendem einige der wichtigsten Aufgaben über Dynamomaschinen behandelt werden, um zu zeigen, wie ungemein einfach sich dieselben auf graphischem Wege lösen lassen.

A. Konstruktion der Charakteristik.

Für die Lösung der gewöhnlich in der Praxis vorkommenden Fragen genügt es im allgemeinen, zwei oder drei Punkte der

*) Das nachstehende Kapitel ist ein Abdruck eines vom Verfasser in der Elektrotechnischen Zeitschrift, Berlin, Juli 1894, veröffentlichten Artikels.

Charakteristik zu kennen, die man auf die übliche Weise mit Zuhülfenahme der Hopkinson'schen Kurven bestimmt. Öfters aber ist es wichtig, eine grössere Zahl von Punkten zu besitzen, in welchem Falle die Berechnung derselben viel zu umständlich wird. Handelt es sich hierbei nicht um allzugrosse Genauigkeit, so wird man sich daher mit Vorteil der nachstehenden graphischen Methode bedienen, die äusserst rasch zum Ziele führt.

Die Hopkinson'sche Formel lautet bekanntlich in ihrer kürzesten Form

$$aw = L_m \,.\, f(B_m) + L_a \,.\, f(B_a) + L_l \,.\, f(B_l),$$

wo B_m, B_a und B_l die Kraftliniendichten in den Magneten, der Armatur und der Luft, L_m, L_a und L_l die respektiven Kraftlinienlängen und aw die gesamte Zahl Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis bedeuten.

Die Werte von $f(B_m)$ und $f(B_a)$ müssen den bekannten Sättigungskurven entnommen werden, für $f(B_l)$ gilt die Formel

$$f(B_l) = 0{,}8 \,.\, K \,.\, B_l.$$

Es ist dies die Gleichung einer Geraden.

Die Gesamtzahl Ampère-Windungen setzt sich also aus den Abscissen zweier Kurven und einer Geraden zusammen, wodurch allerdings die Sache etwas kompliziert aussieht. Glücklicherweise dürfen aber im allgemeinen die Werte der Kurve $f(B_a)$ gegenüber der erheblich grösseren der beiden anderen vernachlässigt werden, oder es darf zum mindesten angenommen werden, $f(B_a)$ sei innerhalb der praktisch in Frage kommenden Grenzen proportional B_a. Der Gang der graphischen Bestimmung ist dann folgender: Man benutzt, je nachdem es sich um die Bestimmung einer Maschine mit schmiedeisernen oder gusseisernen Magnetschenkeln handelt, die Hopkinson'schen Sättigungskurven für Schmiedeisen, bezw. Gusseisen, welche für ähnliche Zwecke in grösserer Anzahl hergestellt werden mögen. In denselben bedeuten die Ordinaten die Anzahl Kraftlinien pro $\%_m{}^2$; die Abscissen die entsprechende Zahl Ampère-Windungen pro $\%_m$ Kraftlinienlänge. Multipliziert man also die Abscissen noch mit L_m, so erhält man

die gesamte Zahl der zur Überwindung des Widerstandes in den Magneten nötigen Ampère-Windungen. Am einfachsten geschieht dies dadurch, dass man die Abscissenaxe neu einteilt, wobei jedem Teilstrich ein L_m-mal grösserer Wert der früheren Einteilung entspricht.

Die Ampère-Windungen zur Überwindung des Luftwiderstandes, sowie des Widerstandes im Armatureisen können, wie bereits bemerkt, als angenähert proportional den Kraftlinien betrachtet werden.

Da den Sättigungskurven die Kraftliniendichte in den Magnetschenkeln zu Grunde liegt, so berechnet man zunächst für irgend ein beliebiges möglichst hohes B_m das entsprechende B_a und B

$$B_a = B_m \cdot \frac{S_m}{S_a}.$$

$$B_l = B_m \cdot \frac{S_m}{S_l}.$$

S_m = Querschnitt des Magneteisens in cm^2.
S_a = „ „ Armatureisens „ „
S_l = „ der Luft „ „

Die hiefür erforderlichen Ampère-Windungen sind ziemlich genau

$$a\,w = L_a \cdot 0{,}0005 \cdot \frac{B_m \cdot S_m}{S_a} + L_l \cdot 0{,}8\, \frac{B_m \cdot S_m}{S_l} \cdot K$$

oder

$$a\,w = B_m \cdot S_m \left(0{,}0005 \cdot \frac{L_a}{S_a} + 0{,}8 \cdot \frac{L_l}{S_l}\, K\right).$$

Die gefundene Zahl wird mit der Ordinate B_m*) und der Abscisse $a\,w$ (Fig. 94) aufgetragen und der Punkt mit dem Koordinatenanfangspunkt O verbunden. Addiert man noch schnell mit Hülfe des Zirkels sämtliche Abscissenwerte der Geraden $O\,A$ zu denjenigen der bereits vorhandenen Sättigungskurve $O\,B$, so stellt die dadurch erhaltene Kurve $O\,C$ die gewünschte Charakteristik dar.

*) In der Figur steht irrtümlicher Weise für B_m Z_m, was der Leser gefl. korrigieren will.

Zu bemerken ist, dass bisher die Kraftlinienstreuung in den Magneten nicht berücksichtigt wurde. Um dieselbe ebenfalls in Rechnung zu ziehen, muss schon für die Sättigungskurve eine neue Ordinateneinheit angenommen werden, die ν (Streuungskoefficient) mal grösser ist, als die ursprüngliche. Es fällt dadurch für eine bestimmte Zahl Ampère-Windungen der damit erreichbare Sättigungsgrad kleiner aus. Selbstverständlich haben sich dann die für die Luft und Armatur bestimmten Ampère-Windungen auf diese neuen Ordinaten zu beziehen.

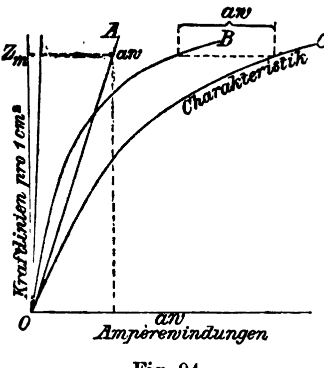


Fig. 94.

Will man die charakteristische Kurve zwischen Ampère-Windungen und EMK haben, so müsste zum Schlusse noch einmal eine Transformation der Ordinaten vorgenommen werden. Man kann sich also diese zweimalige Arbeit ersparen, indem man die aus der letzten Gleichung erhaltene Zahl mit ν multipliziert und später die Ordinateneinheit der zusammengesetzten Kurve ν mal grösser annimmt, d. h. alle Ordinaten durch ν dividiert.

Beispiel. Man habe die Charakteristik einer 2 poligen Dynamo von 100 A. und 120 V. bei 1470 Touren aufzuzeichnen, mit gusseisernen Magnetschenkeln von durchwegs gleichem Querschnitt.

Die Dimensionen der Maschine seien wie folgt:

$L_m = 100;$ $S_m = 390.$
$L_a = 37;$ $S_a = 220.$
$L_l = 0{,}6;$ $S_l = 631.$

Anzahl Drähte auf der Armatur $= 180,$
Streuungskoëfficient $\nu = 1{,}2;$ $K = 0{,}9.$

Wir benutzen hierzu die in Fig. 95 dargestellte Magnetisierungskurve für Gusseisen, indem wir alle Abscissenwerte mit $L_m = 100$ multiplizieren.

Wir gelangen auf diese Weise zu der mit b bezeichneten neuen Abscissenskala, bei welcher die Abscissen die total zur Überwindung

des Magnetwiderstandes benötigten Ampère-Windungen bedeuten und zwar mit Vernachlässigung der Streuung. Um auch die letztere in Rechnung zu ziehen, müssen später noch alle Ordinaten durch ν dividiert werden.

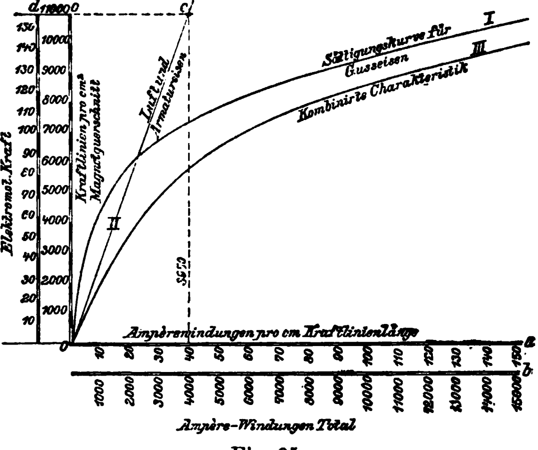


Fig. 95.

Zur Bestimmung der Ampère-Windungen, welche zur Kompensation des Übergangs-Widerstandes von den Polen zur Armatur und im Armatureisen selbst dienen, mag die oben angegebene Gleichung angewandt werden, indem wir für B_m eine möglichst grosse Zahl, z. B. 11000 einsetzen.

$$aw = 11000 \,.\, 390 \left(0{,}0005 \,.\, \frac{37}{220} + 0{,}8 \,.\, \frac{0{,}6}{631} \,.\, 0{,}9\right)$$
$$= \text{rund } 3290.$$

Diese Zahl ist noch mit ν zu multiplizieren:

$$1{,}2 \,.\, 3290 = 3950.$$

Man verbindet nun den Punkt e mit den Koordinaten 3950 und 11000 mit dem Punkte O und addiert vermittelst eines Zirkels die Abscissen der Geraden eO zu den entsprechenden Abscissen der Kurve I; so erhält man Kurve III, welche als die gesuchte Charakteristik zu betrachten ist, nachdem man die Ordinatenskala für die direkte Ablesung in Volt neu einteilt.

Um für irgend eine Ordinate der früheren Skala die Spannung ablesen zu können, hat man den Wert mit

$$\frac{1}{\nu} \,.\, \frac{1470 \,.\, 180 \,.\, 390}{60 \,.\, 10^8} = 0{,}0143$$

zu multiplizieren, was in der Skala d geschehen ist, und zwar ist hierin die Streuung bereits berücksichtigt.

Die im Vorangegangenen dargelegte graphische Methode zur approximativen Ermittelung der Charakteristik ist selbstverständlich nur dann anwendbar, wenn die Magnete entweder ganz aus Schmiedeisen oder ganz aus Gusseisen hergestellt sind und längs des ganzen magnetischen Kraftlinienlaufes gleichen Querschnitt besitzen.

B. Bestimmung des Spannungsabfalles von Nebenschlussmaschinen.

Picou gibt in seinem Buche „Traité des Machines Dynamos-électriques“ eine sehr hübsche Methode an. Die Fig. 96 stellt die Charakteristik einer Nebenschlussmaschine, bezogen auf Erregerstromstärke und EMK dar; E sei die Spannung, mit welcher die Maschine selbst erregt bei nahezu stromloser Armatur läuft.

$$\frac{E}{i} = tg\,\alpha = r$$

(Widerstand der Magnete)

$$i = \frac{E}{r}.$$

Verbindet man E mit O, so kann die Erregerstromstärke für irgend eine beliebige Bürstenspannung gefunden werden, indem man die jener Spannung entsprechende Abscisse der Geraden OE bestimmt.

Es sei nun zu untersuchen, um wieviel die Spannung E bei einer gewissen Armaturstromstärke J und einem Armaturwiderstand R sinke. Zu diesem Zwecke mache man e (siehe Fig. 96) $= JR + a$. Hierbei bedeutet a den mutmasslichen Spannungsabfall, hervorgerufen durch die Armaturreaktion, und muss schätzungsweise angenommen werden; kleinere Fehler in der Annahme derselben sind übrigens von wenig Einfluss auf das endgültige Resultat. Wo genauere Anhaltspunkte über dessen Grösse fehlen, kann man ihn ungefähr $= JR$ annehmen.

Den Punkt A verbinde man mit O und ziehe durch E parallel zu AO die Gerade EE_1.

E_1 entspricht dem Punkt, auf welchen die ursprüngliche Spannung E lediglich infolge des Spannungsverlustes in der Armatur sinkt. Nun folgt aber eine sekundäre Erscheinung. Gleichzeitig hat sich auch die Erregerstromstärke geändert. Statt i beträgt sie nur noch $\frac{E_1}{r} = i_1$. Man findet sie, wenn man zu E_1 eine Parallele bis zur Geraden OE zieht und das Loth fällt.

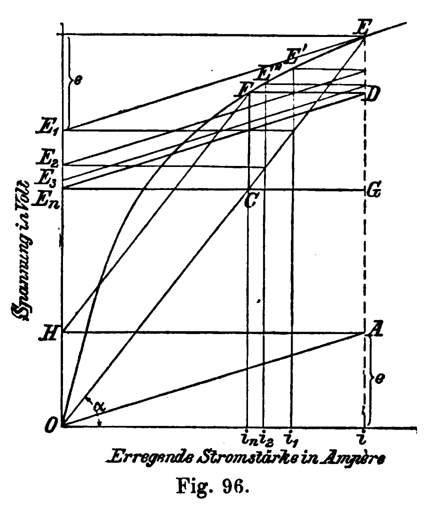


Fig. 96.

Die neue Stromstärke i_1 erzeugt aber eine Spannung E', oder wenn man davon e auf die bereits erläuterte Weise abzieht, so ergibt sich als zweiter Annäherungswert die Spannung E_2.

Fährt man auf diese Weise weiter fort, so erhält man schliesslich die geschlossene Figur

$$E_n\, D\, F\, C,$$

und es ist leicht einzusehen, dass

$$FC = DG = e$$

sein muss.

Dies führt uns aber sofort zu einer bedeutend einfacheren Lösung der Aufgabe. Zieht man nämlich FH parallel OE, so ist, wie ersichtlich, $HO = e$.

Man braucht daher bloss, wie dies in Fig. 97 geschehen ist, $OH = e$ zu machen, durch den Punkt H eine Parallele zu OE zu ziehen und vom Schnittpunkt mit der Charakteristik das Loth auf die Abscissenaxe zu

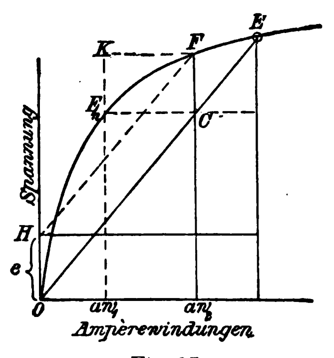


Fig. 97.

fällen, so ist C die gesuchte Spannung der Maschine, aw_2 die entsprechende Erregung der Magnete.

Die Kurve zeigt nun auch, dass der Spannungsabfall um so grösser ausfällt, je niedriger der Sättigungsgrad der Maschine ist.

C. Bestimmung einer Kompoundwicklung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist äusserst einfach. Fig. 98 sei die Charakteristik der fraglichen Maschine, bezogen auf erregende Ampère-Windungen und EMK.

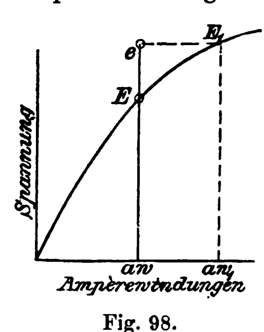


Fig. 98.

E soll die Bürstenspannung bedeuten, die man konstant zu halten wünscht.

Sucht man den Punkt E auf der Charakteristik und fällt das Loth, so wird durch die Abscisse dieses Punktes aw die Zahl der Ampère-Windungen bestimmt, welche bei Leerlauf erforderlich ist, d. h. die Ampère-Windungen der Nebenschlusswicklung. In diesem Falle ist E nicht nur Bürstenspannung, sondern auch EMK.

Ist e wiederum der Spannungsverlust in der Armatur + dem mutmasslichen Spannungsabfall durch Armaturreaktion, so muss für $E =$ konst. eine EMK oder interne Spannung E_1 in der Maschine erzeugt werden, welche um diesen Betrag höher ist.

Die hierzu erforderlichen Ampère-Windungen sind aber nach der Fig. 98 aw_1; hieraus ergeben sich die Ampère-Windungen der Kompoundwicklung $= aw_1 - aw$.

D. Bestimmung von Nebenschlussregulatoren.

Nebenschlussregulatoren können verschiedenartigen Zwecken dienen:

a) zur Erreichung einer konstanten Bürstenspannung bei variabler Belastung, jedoch konstanter Tourenzahl;

b) um die Bürstenspannung gleich zu erhalten, wenn die Tourenzahl variiert;

c) um den Einfluss von Belastung und Tourenschwankung zugleich auszugleichen;

d) um irgendwelche Variation in der Spannung zu bewirken.

Aufgabe a): Regulierung von Nebenschlussmaschinen bei verschiedener Belastung.

Es sollen mit Bezug auf Fig. 99 folgende Bezeichnungen gelten:

E Bürstenspannung,

r_m Widerstand der Magnete,

r_w „ des Nebenschlussregulators,

m Anzahl der Windungen pro magnetischen Stromkreis.

Es sei vorausgesetzt, man verfüge über einen die Dynamo antreibenden Motor von genau konstanter Tourenzahl, und die Disposition werde so getroffen, dass bei vollem Strom aller Widerstand im Regulator ausgeschaltet sei.

Es ist nun zu untersuchen, wie viel Widerstand den Magneten vorgeschaltet werden muss, damit die Spannung bei Leerlauf genau die gleiche wie bei vollem Strom bleibe. Man bestimmt zunächst die Erregerstromstärken für Leerlauf (i_1) und vollen Strom (i_2), und zwar auf die soeben unter C. behandelte Weise, indem man die Ampère-Windungen für die Spannung E und $E + e$ aufsucht. Dann ist

Fig. 99.

$$i_1 = \frac{a\,w_1}{m},$$

$$i_2 = \frac{a\,w_2}{m}.$$

Ferner

$$r_m + r_w = \frac{E}{i_1} = \frac{m\,E}{a\,w_1} = tg\ \alpha_1,$$

$$r_m = \frac{E}{i_2} = \frac{m\,E}{a\,w_2} = tg\ \alpha_2.$$

Die Werte von r_m und $r_m + r_w$ lassen sich aber auch direkt ableiten. Man braucht nämlich nur zur Ordinatenaxe im Abstande m eine Parallele zu ziehen. Dieselbe schneidet die Geraden EO und KO in den Punkten E_1 und E_2 und es gilt selbstverständlich auch für diese Punkte die Beziehung

$$tg\,\alpha_1 = \frac{m\,E_1}{m} = E_1 = r_m + r_w,$$

$$tg\,\alpha_2 = \frac{m\,E_2}{m} = E_2 = r_m.$$

Die Längen von E_1 und E_2 geben also ein direktes Mass für die Grössen der Widerstände.

$$E_1 - E_2 = r_w,$$

d. h. gleich dem gesuchten Vorschaltwiderstand.

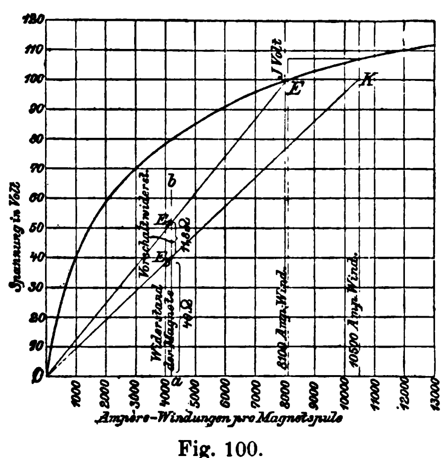


Fig. 100.

Beispiel. Eine Nebenschlussmaschine für 100 V. und 50 A. mit den in Fig. 100 gekennzeichneten magnetischen Eigenschaften ist samt dem zugehörigen Regulierwiderstande derart zu disponieren, dass die Spannung sowohl bei Leerlauf als bei voller Belastung konstant gehalten werden kann.

Spannungsabfall bei *50 A.* = *7 V.* *)

Die Charakteristik zeigt, dass bei Leerlauf $a w_1 = 8100$, „ voller Belastung $a w_2 = 10500$ Ampère-Windungen erforderlich sind.

Lassen wir einen Stromverlust in der Wicklung von 5 % der gesamten Stromstärke zu, so müssen folglich die Magnete mit je

$$\frac{10500}{0{,}05 \cdot 50} = 4200 \text{ Windungen}$$

versehen werden.

*) In der Fig. 100 lese man statt *J* Volt: 7 Volt.

Die weitere Rechnung ergibt dann

$$r_m + r_w = \frac{m \cdot E}{a w_1} = \frac{4200 \cdot 100}{8100} = 51{,}8\ \Omega.$$

$$r_m = \frac{m \cdot E}{a w_2} = \frac{4200 \cdot 100}{10500} = 40{,}0\ \Omega.$$

$$r_w = 51{,}8 - 40{,}0 = 11{,}8\ \Omega.$$

Diese Zahlen lassen sich noch mit ziemlicher Genauigkeit ablesen, wenn man im Abstande

$$m = 4200$$

die Parallele ab zur Ordinatenaxe zieht und die Schnittpunkte E_1 und E_2 konstruiert.

Besizt die Maschine zwei Magnetspulen von 0,52 m mittlerer Windungslänge, so ist dem Magnetdraht ein Querschnitt von

$$\frac{2m \cdot \mathfrak{L}}{50 \cdot r_m} = \frac{2 \cdot 4200 \cdot 0{,}52}{50 \cdot 40} = 2{,}18\ \text{mm}^2$$

zu geben.

Aufgabe b): Regulierung von Nebenschlussmaschinen auf konstante Spannung bei verschiedener Tourenzahl.

Wir wollen zunächst der Einfachheit halber voraussetzen, die Maschine laufe leer oder wenigstens mit so geringem Strom, dass der Spannungsverlust thatsächlich vernachlässigt werden könne.

n = normale Tourenzahl,

n_1 = grösste oder kleinste anormale Tourenzahl,

$$\frac{n_1}{n} = \gamma.$$

Je nachdem die Umdrehungsgeschwindigkeit eine Zunahme oder Abnahme erfährt, wird $\gamma >$ oder < 1 ausfallen.

Die Aufgabe kann für beide Fälle allgemein gelöst werden.

Um die Charakteristik der Maschine für die abnormale Tourenzahl zu erhalten, multipliziere man alle Ordinaten der ursprünglichen Charakteristik (Kurve I) in Fig. 101 und 102 mit γ. Kurve II von Fig. 101 zeigt dies für die Tourenvermehrung, Kurve II von Fig. 102 für die Tourenverminderung.

E sei die Spannung der Maschine für Selbsterregung und bei der normalen Tourenzahl n. Verbindet man E mit O durch eine Gerade, die man nach rückwärts hin verlängert, so entspricht der Schnittpunkt E_n derselben mit der Kurve II der Spannung, welche die Maschine bei der veränderten Tourenzahl annehmen würde. Es soll dies nur für eine Vergrösserung der Drehgeschwindigkeit nachgewiesen werden, da sich die Sache für eine Verminderung derselben ganz analog verhält.

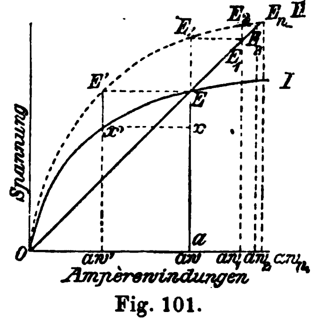


Fig. 101.

Der Vorgang kann ungefähr folgendermassen gedacht werden: Im ersten Moment steigt die Spannung E lediglich zufolge der erhöhten Tourenzahl auf E_1; wie ersichtlich nimmt aber auch die Erregerstromstärke der Maschine zu und zwar in direktem Verhältnisse zu der Bürstenspannung. Die entsprechende magnetomotorische Kraft steigt also von aw auf aw_1. Dieser Erregung entspricht aber die Spannung E_2, die magnetomotorische Kraft erhöht sich neuerdings auf aw_2 etc. etc.

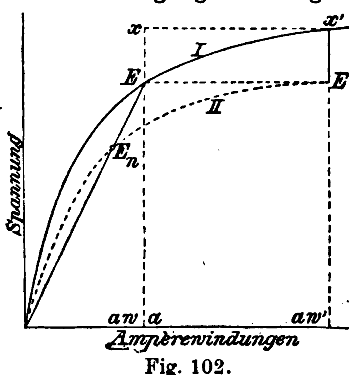


Fig. 102.

Es ist augenscheinlich, dass ein Gleichgewichtszustand im Schnittpunkte der Geraden EO mit der Kurve II eintreten muss.

Für die Lösung der gestellten Aufgabe bleiben nun allerdings diese Vorgänge vollständig belanglos. Man wünscht ja im Gegenteil die Spannung der Maschine konstant zu erhalten.

Zu diesem Zwecke sucht man auf den Kurven II diejenige Zahl Ampère-Windungen, welche die Spannung E ergibt. Diese ist aw'.

Man sieht sofort, dass eigentlich zur Lösung der Frage die Hülfskurve II unnötig ist. Da nämlich die sich für die Spannung

$E' = E$ auf Kurve II ergebenden Ampère-Windungen übereinstimmen mit denjenigen zur Erreichung der Spannung

$$x' = \frac{E'}{\gamma} = \frac{E}{\gamma}$$

bei normaler Tourenzahl, so braucht man also bloss auf der Senkrechten aE den Punkt x im Abstande $\frac{E}{\gamma}$ von a aufzusuchen und die Parallele xx' zu ziehen. Die Abscisse des Schnittpunktes x' ist die gesuchte Zahl Ampère-Windungen.

Für $\gamma > 1$ wird $aw' < aw$,
„ $\gamma < 1$ „ $aw' > aw$.

Im ersteren Falle muss also die Erregung durch Vorschalten von Widerstand vor die Magnete vermindert werden, im letzteren ist es notwendig, durch Verringerung des gesamten Widerstandes im Nebenschluss die Stromstärke zu steigern, was selbstverständlich nur möglich ist, wenn von Anfang an der Widerstand der Magnete so gewählt wird, dass schon bei normaler Geschwindigkeit ein gewisser Regulierwiderstand r_w vorgeschaltet werden muss.

Diese Widerstände berechnen sich schliesslich wie folgt:

Für $n_1 > n$

$$r_m + r_w = \frac{E}{\frac{aw'}{m}}, \qquad r_m = \frac{E}{\frac{aw}{m}},$$

woraus

$$r_w = m \, . \, E\left(\frac{1}{aw'} - \frac{1}{aw}\right).$$

Für $n_1 < n$

$$r_m + r_w = \frac{E}{\frac{aw}{m}}, \qquad r_m = \frac{E}{\frac{aw'}{m}},$$

woraus

$$r_w = mE\left(\frac{1}{aw} - \frac{1}{aw'}\right).$$

Zieht man wie im vorigen Beispiel im Abstande m eine Parallele zur Ordinatenaxe, so lassen sich diese Widerstände direkt ablesen.

Beispiel. Eine Dynamo für 125 A. (Fig. 103) soll bei Leerlauf und Tourenschwankungen von 9 % unter und 10 % über normal auf 120 V. regulierbar

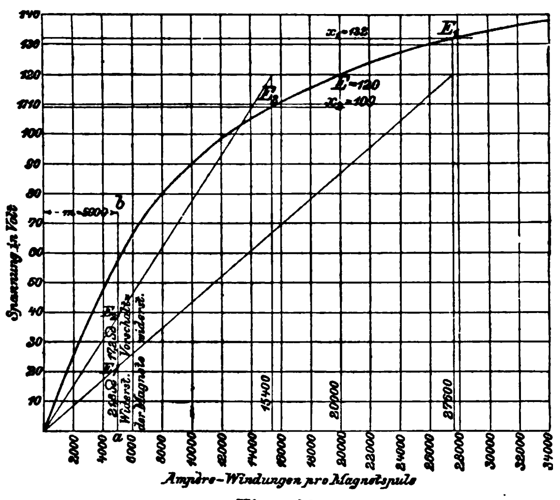


Fig. 103.

sein. Wie sind die Magnete und der Vorschaltwiderstand zu bemessen, wenn in den Magneten ein Stromverlust von 3,2 % bei normaler Tourenzahl zugelassen werden soll?

3,2 % Stromverlust entpricht 4 A.,

Windungen pro Magnet $= \frac{20000}{4} = 5000$ (siehe Fig. 103).

Für erhöhte Tourenzahl ist

$$\gamma = 1{,}1; \qquad x_2 = \frac{1}{\gamma} \,.\, 120 = 109.$$

Für verminderte Tourenzahl ist

$$\gamma = 0{,}91; \qquad x_1 = \frac{1}{\gamma} \,.\, 120 = 132.$$

Ampère-Windungen bei erhöhter Tourenzahl $= 15400$,
bei verminderter $= 27600$,

$$r_m + r_w = \frac{5000 \,.\, 120}{15400} = 39\ \Omega,$$

$$r_m = \frac{5000 \, . \, 120}{27600} = 21{,}8 \; \Omega,$$

$$r_w = 39 - 21{,}8 = 17{,}2 \; \Omega.$$

Vergleiche auch graphische Bestimmung von r_m und r_w.

Aufgabe c): Ausgleich von Belastungs- und Tourenschwankungen.

Der gesuchte Regulierwiderstand genügt offenbar allen Anforderungen, wenn man damit imstande ist, sowohl bei Leerlauf und der grössten Tourenzahl als auch bei maximaler Stromentnahme und kleinster Tourenzahl die Spannung konstant zu erhalten. Von diesen beiden extremen Fällen wurde der erstere bereits in Aufgabe b) erörtert.

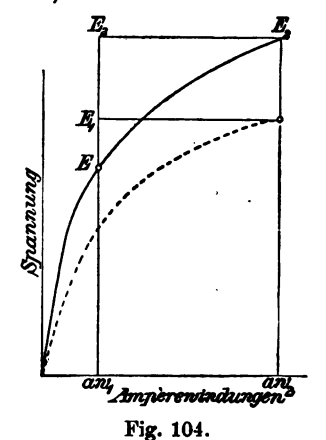


Fig. 104.

Zur Lösung der letzteren Frage bedienen wir uns wieder der in Fig. 102 dargestellten Kurve I für Leerlauf bei normaler Tourenzahl n, und II für die geringere Tourenzahl n_1

$$\frac{n_1}{n} = \gamma.$$

Ist E die gewünschte konstant zu haltende Bürstenspannung, für welche $a w_1$ Ampère-Windungen bei normaler Tourenzahl und Leerlauf (siehe Fig. 104) erforderlich sind, so findet man die magnetomotorische Kraft bei verminderter Armaturgeschwindigkeit, indem man für

$$E_1 = E + e$$

auf der Kurve II die Abscisse $a w_2$ aufsucht.

Man sieht übrigens sofort, dass zu diesem Zwecke die Hülfskurve II nicht unumgänglich notwendig ist, da $a w_2$ ebensowohl Abscisse der Spannung E_1 auf der Kurve für verminderte Tourenzahl als der Spannung E_2 auf der Kurve für die normale Tourenzahl ist.

Dies führt zu folgender einfacheren Behandlungsweise der Aufgabe:

Man addiere zu E den Spannungsverlust e, dividiere die Summe durch γ und suche für die so erhaltene Spannung E_2 auf der ursprünglichen Charakteristik der Dynamo die zugehörige Zahl Ampère-Windungen.

Für die Berechnung des Drahtquerschnittes nehmen wir wieder die bereits bekannten Gleichungen 54—56 zu Hülfe.

m = Anzahl Windungen pro Spule,
m_1 = Anzahl hintereinander geschalteter Spulen,
$\mathfrak{L}$ = Länge einer Magnetwindung in $^m/$.

(Gl. 54) $$s = \frac{a\,w_2 \,.\, m_1 \,.\, l}{E \,.\, 50}.$$

(Gl. 56) $$m = \frac{a\,w_2}{\mathfrak{J}}.$$

Dies ist also der Querschnitt, welcher dem Magnetdrahte gegeben werden muss zur Erzielung der Bürstenspannung E bei minimaler Geschwindigkeit n_1 und maximalem Armaturstrom, wobei sämtlicher Regulierwiderstand ausgeschaltet ist.

Für den Leerlauf und bei der höheren Tourenzahl sind noch $a\,w_1$ Ampère-Windungen erforderlich. In diesem Falle ist den Magneten ein Widerstand r_w vorgeschaltet.

$$r_w = \frac{E\,m}{a\,w_1} - r_m \quad \text{und} \quad r_m = \frac{E\,m}{a\,w_2},$$

woraus sich

$$r_w = E\,m\left(\frac{1}{a\,w_1} - \frac{1}{a\,w_2}\right)$$

ergibt, d. h. die uns bereits bekannte Formel.

Beispiel. Es sei die Aufgabe gestellt, den Vorschaltwiderstand und die Wicklung einer Maschine von 60 V. Bürstenspannung (3 V. Spannungsverlust in der Armatur) und 80 A. so zu disponieren, dass die Bürstenspannung für irgendwelche Belastung bei 10 % Tourenschwankungen über und unter normal kontant gehalten werden kann.

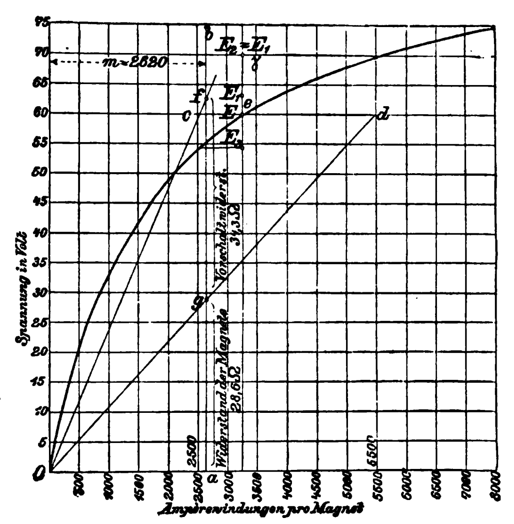


Fig. 105.

Die Charakteristik dieser Maschine ist in Fig. 105 veranschaulicht.

a) Bestimmung der aw bei minimaler Tourenzahl und maximalem Strom.

$$E_1 = E + e = 60 + 3 = 63\ V.;$$

$$\gamma = \frac{v_1}{v} = 0{,}9;$$

$$E_2 = \frac{E_1}{\gamma} = \frac{63}{0{,}9} = 70\ V.;$$

$$aw_2 = 5\,500.$$

b) Bestimmung der aw bei maximaler Tourenzahl und Leerlauf

$$\gamma = \frac{v_1}{v} = 1{,}1;$$

$$E_3 = \frac{E}{\gamma} = \frac{60}{1{,}1} = 54{,}5\ V;$$

$$aw_1 = 2500.$$

c) Berechnung des Magnetdrahtquerschnittes und der Windungszahl für $m_1 = 2;\ L = 0{,}5\ m/$:

$$s = \frac{5500\ .\ 2\ .\ 0{,}5}{60\ .\ 50} = 1{,}83\ m/m^2.$$

Gestattet man einen Stromverlust von 7 % = $2{,}1\ A.$ in der Magnetwicklung, so ergibt dies

$$\frac{5500}{2,1} = 2620 \text{ Windungen pro Spule.}$$

d) **Bestimmung des Vorschaltwiderstandes.**

Man ziehe durch die Schnittpunkte c und d der über den Abscissengrössen 2500 und 5500 errichteten Perpendikel mit der Parallelen durch E zur Abscissenaxe Gerade nach dem Punkte O, ferner errichte man im Abstande $m = 2620$ eine Parallele zur Ordinatenaxe. Man erhält auf diese Weise die Schnittpunkte g und f und es ist Länge ag gleich dem gesuchten Widerstande der Magnete, Länge gf gleich dem gesuchten Vorschaltwiderstand

Das Resultat kann noch wie folgt kontrolliert werden.

$$r_m + r_w = \frac{m \,.\, E}{a w_1} = \frac{2620 \,.\, 60}{2500} \; 62,9 \; \Omega.$$

$$r_m = \frac{E}{i} = \frac{60}{2,1} = 28,6 \; \Omega.$$

$$r_w = 62,9 - 28,6 = 34,3 \; \Omega.$$

Aufgabe d): Änderung der Bürstenspannung.

Angenommen, die Bürstenspannung soll zwischen den Grenzen E_1 im Minimum und E_2 im Maximum reguliert werden können und zwar unabhängig von der jeweiligen Stromstärke in der Armatur.

Dies wird unter allen Umständen erreicht, wenn man die Magnetwicklung und den Vorschaltwiderstand für folgende extreme Fälle dimensioniert:

Ohne Vorschaltwiderstand, Bürstenspannung $= E_2$.
Aller Widerstand vorgeschaltet, Bürstenspannung $= E_1$.

Aus der Charakteristik ergebe sich für E_1 eine magnetomotorische Kraft $a w_1$ Ampère-Windungen, für E_2 Volt an den Bürsten oder $E_2 + e$ Volt interne Spannung eine solche $= a w_2$.

Daraus finden wir gemäss dem soeben erörterten Querschnitt des Magnetdrahtes

$$s = \frac{a w_2 \,.\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E_2 \,.\, 50}.$$

Ferner

$$a w_2 = \frac{m E_2}{r_m},$$

$$a w_1 = \frac{m E_1}{r_m + r_w},$$

oder

$$r_w = m \left(\frac{E_1}{a w_1} - \frac{E_2}{a w_2} \right).$$

Direkt liesse sich dieser Widerstand wiederum ablesen, indem man, wie früher gezeigt wurde, im Abstande *m* eine Parallele zur Ordinatenaxe zieht (siehe Fig. 106).

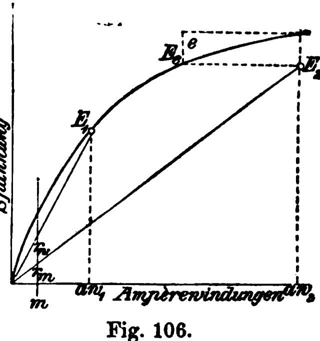


Fig. 106.

E. Elektrische Kraftübertragung mittels zweier Serienmaschinen.

Die Bedingungen, welche hier zu erfüllen sind, wurden bereits auf Seite 69—73 entwickelt.

VI. Bürstenverschiebung und Funkenbildung*).

Die Leistungsfähigkeit einer Maschine ist, abgesehen von den nötigen mechanischen Eigenschaften, durch die Erwärmung und die Funkenbildung am Commutator begrenzt. Während es nun ein Leichtes ist, der ersten Bedingung zu genügen, existieren leider bis heute keine allgemein richtigen Formeln, um die Bürstenverschiebung, oder, was in vielen Fällen gleichbedeutend ist, die Funkenbildung zum voraus zu bestimmen. In dem Vorstehenden hat es der Verfasser versucht, eine Theorie der Bedingungen zu entwickeln, welche eine Beurteilung von Gleichstrommaschinen in dieser Beziehung ermöglicht; selbstverständlich müssen wir uns hierbei mit einer gewissen Approximation begnügen, weil sich die ungemein komplizierten Erscheinungen sonst unmöglich in einer für den praktischen Zweck verwendbaren Form darstellen lassen.

Fig. 107—109 stellen 3 verschiedene Lagen einer Armatur dar und zwar

1. im Momente, wo die Spule aa zum Kurzschluss kommt;
2. im Momente, wo der Strom darin gleich Null ist und
3. im Momente, wo der Strom commutiert ist.

Wir machen hierbei die Beobachtung, dass sich die magnetische Axe der Armatur successive von I nach II und III bewegt. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich diese Bewegung vollzieht, ist jedoch keine vollständig gleichmässige, sondern sie ist, wie wir später sehen werden, im Momente des Kurzschlusses am grössten und nimmt nach und nach ab.

*) Teilweiser Abdruck eines Aufsatzes des Verfassers: „Die Beurteilung von Gleichstrommaschinen mit Bezug auf die Funkenbildung", Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin, Heft 38 und 39, 1896, vergleiche auch Eclairage Electrique, Paris, 17 Oct. 1896.

Es sei die Kraftliniendichte im Zacken I gleich B_a, und S der Querschnitt, so findet eine Kraftlinienänderung von $+ B_a S$

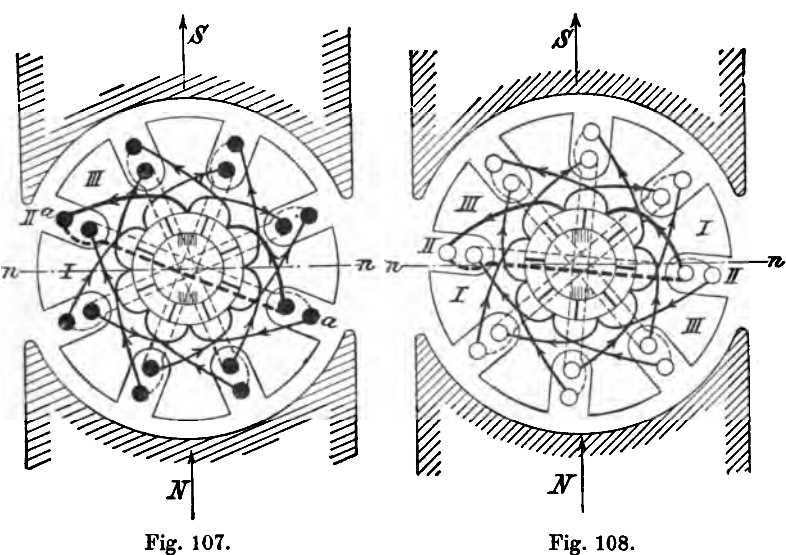


Fig. 107. Fig. 108.

bis $— B_a S$ statt. Dadurch wird notwendigerweise in der Spule eine EMK erzeugt, welche die Abnahme des ursprünglichen Stromes, oder, nachdem er commutiert ist, das Anwachsen desselben zu verhindern sucht. Damit also beim Unterbruch des Kurzschlusses kein Funken entsteht, muss durch Verschieben der Bürsten (beim Generator im Sinne der Drehrichtung, beim Motor umgekehrt) eine Gegen-EMK erzeugt werden, welche die Commutation derart

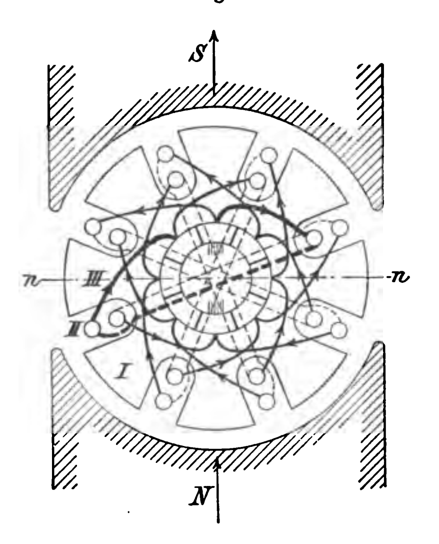


Fig. 109.

beschleunigt, dass im Momente, wo die Bürsten eine Lamelle verlassen, der Strom bereits commutiert ist und seine normale Grösse erreicht hat.

A. Ableitung der Grundformeln.

Es sei

N totale Zahl Drähte am Umfange der Armatur;

N_1 Anzahl Armatursektionen (für glatte Armaturen $= \frac{N}{N_2}$, für Zackenarmaturen = Anzahl Zacken);

N_2 Anzahl Commutatorsegmente;

E Klemmenspannung in Volt;

J Gesamtstrom im äusseren Stromkreise;

n Tourenzahl per Minute;

$2p$ Anzahl Pole;

$2p_1$ Anzahl Bürstenstifte;

r Widerstand einer Armaturspule $\left(\frac{N}{N_2}\right)$;

εE Ohm'scher Spannungsverlust ($= 0{,}02\ E - 0{,}05\ E$ beispielsweise);

$\varepsilon' E$ totaler Spannungsabfall (Armaturreaktion inbegriffen);

D Armaturdurchmesser in %m;

l Armaturlänge in %m.

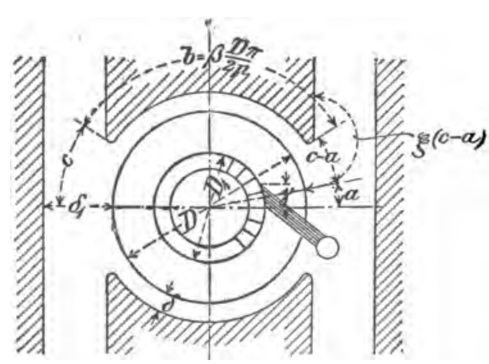


Fig. 110.

Nennt man schliesslich noch φ die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche in einem gegebenen Momente durch die Spule fliesst und deren Grösse von der jeweiligen Stromstärke i abhängt, so ist die EMK der „Selbstinduktion“

$$e = -\frac{\text{Windungszahl}}{10^8} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{dLi}{dt} \text{ Volt},$$

sofern der sogenannte Selbstinduktionskoefficient L in „Henry" ausgedrückt ist.

Der Selbstinduktionsstrom ist folglich:

$$i = \frac{e}{r} = \frac{1}{r} \cdot \frac{-dLi}{dt} = -\frac{L}{r}\frac{di}{dt},$$

$$\frac{di}{i} = -\frac{r}{L} \cdot dt,$$

oder

$$i = \int \frac{-L\frac{di}{dt}}{r} = a \cdot e^{-\frac{r}{L}t}.$$

$$e = 2{,}718.$$

a ist eine Konstante. Um dieselbe zu bestimmen, genügt folgende Überlegung.

Im Momente des Kurzschlusses ist $t = 0$ und $i = \frac{J}{2p_1}$, folglich

$$a = \frac{J}{2p_1}.$$

Für die weitere Entwicklung der Gleichungen ist es bequemer, statt den Stromstärken die sie erzeugende EMK einzuführen. Wir finden in gleicher Weise

$$81. \qquad E_1' = E_1 \cdot e^{-\frac{r}{L}t}.$$

$E_1' = EMK$ in der Spule zur Zeit t,

E_1 ursprüngliche EMK = Ohm'scher Verlust.

Diese Gleichung gilt, solange die Bürsten in der neutralen Zone gelassen werden. Verschiebt man dieselben in der Richtung der Drehung, so wird eine EMK E_2 erzeugt, welche sich beim Motor zur ersteren addiert, beim Generator subtrahiert.

$\frac{E_2}{r}$ ist der maximale Strom, welcher dieser EMK entspricht. Da das Anwachsen desselben ebenfalls dem Einflusse der Selbstinduktion unterworfen ist, so finden wir in analoger Weise die ihn erzeugende effektive EMK zu einer beliebigen Zeit

82. $$E_2' = E_2\left(1 - e^{-\frac{r}{L}t}\right),$$

der eigentliche Strom ist daher

83. $$i = \frac{E_1' - E_2'}{r}.$$

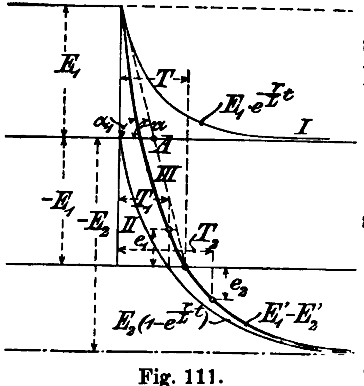


Fig. 111.

Mit Bezug auf die eben ausgesprochene Bedingung für funkenlosen Gang muss aber

$$i = -\frac{J}{2p_1}$$

sein, oder

84. $$E_1' - E_2' = -E_1.$$

Aus den Gleichungen 81 bis 84 ergibt sich

85. $$\frac{r}{L}t = Log\left(\frac{E_2 + E_1}{E_2 - E_1}\right),$$

oder für

$$\frac{E_2}{E_1} = \eta.$$

86. $$\frac{r}{L}t = Log\left(\frac{\eta + 1}{\eta - 1}\right).$$

In der am Schlusse des Buches stehenden Tabelle XI sind die Werte von $e^{+\frac{r}{L}t}$ und $Log\left(\frac{\eta + 1}{\eta - 1}\right)$ für verschiedene Grössen von η enthalten.

B. Bestimmung von $\frac{r}{L}t$ (Fig. 110).

87. $$r = \frac{\varepsilon \,.\, 4\, p_1^2 \,.\, E}{N_2 \,.\, J}.$$

Diese Formel mag nahezu richtig für Maschinen mit Metallbürsten sein, bei welchen der Kontaktwiderstand zu vernachlässigen ist; bei Maschinen mit Kohlenbürsten ist r, wie wir sehen werden, etwas grösser.

t bedeutet die Zeitdauer, während welcher eine Spule im Kurzschluss bleibt. Mit Bezug auf Fig. 110 ist dann

88. $$t = \frac{\gamma\, 60}{D_1\, \pi\, n}.$$

Die Bestimmung von L kann allerdings nur approximativ gemacht werden; es sind 4 Fälle zu betrachten:

a) Zackenarmatur.

Wir wollen mit U die Leitungsfähigkeit des um die kurzgeschlossene Spule gebildeten magnetischen Stromkreises bezeichnen, wobei nur diejenigen Kraftlinien in Betracht kommen sollen, welche diese Spule umkreisen, indem angenommen werden darf, dass die übrigen durch die gesamte Armaturwicklung amortisiert werden. Gleicherweise sei die Streuung gegen das Gestell hin vernachlässigt.

Es ist für Zackenarmaturen (Fig. 112):

$$U = \frac{4\,\pi\, l}{10}\left[\int_x^{x_1} \frac{d\,x}{\pi\, x} + \frac{y}{2\,x}\right]$$

$$= \frac{4\,\pi\, l}{10}\left[\frac{2{,}3}{\pi}\, log\, \frac{x_1}{x} + \frac{y}{2\,x}\right].$$

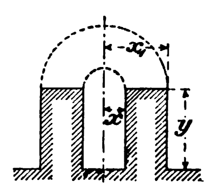


Fig. 112.

Im allgemeinen ist mit ziemlicher Annäherung

$$\frac{x_1}{x} = 3, \text{ desgleichen } \frac{y}{2\,x} = 3,$$

und wenn man ferner berücksichtigt, dass die Linien im innern des Zackens nur zu 50 % ausgenutzt sind, so kann

$$U = 2{,}3\, l$$

gesetzt werden.

b) Halbgeschlossene Zacken.

Für die gewöhnlichen Abmessungen ist approximativ

$$U = 3\, l.$$

c) Locharmaturen.

Für Locharmaturen ist U augenscheinlich noch grösser, doch sind hier die Verhältnisse so kompliziert, dass sie sich einer Berechnung einfach entziehen.

Wir setzen in solchen Fällen

$$U = 3{,}5\, l.$$

d) Glatte Armatur (Fig. 113).

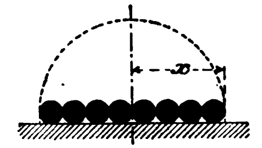


Fig. 113.

Approximativ ist

$$U = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{l\, 2x}{\pi x}\, 0{,}5 = 0{,}4\, l.$$

Hieraus folgt allgemein

$$89. \quad L = U \cdot \frac{N^2}{N_1 \cdot N_2} \cdot \frac{1}{10^8} = \frac{U'\, l \cdot N^2}{10^8 \cdot N_1\, N_2} = \frac{U'\, l \cdot N q}{10^8 \cdot N_2}.$$

$$N_1 = \frac{N}{q}.$$

Ferner aus Gleichungen 86 bis 89

$$90. \quad \frac{r\, t}{L} = \frac{\varepsilon \cdot 4\, p_1^2\, E \cdot \gamma \cdot 60 \cdot 10^8}{J\, D_1\, \pi\, n\, U' \cdot l\, N q}.$$

In dieser Gleichung kann für E

$$91. \quad E = \frac{N\, n\, \Phi\, p}{60 \,.\, 10^8\, p_1\, (1 \pm \varepsilon')} = \frac{N\, n\, D\, \pi\, \beta\, l\, B}{60 \,.\, 10^8\, p_1\, (1 \pm \varepsilon')\, 2}$$

gesetzt werden.

Φ, totale Zahl Linien per Pol.

Für Generatoren ist $(1 + \varepsilon')$ zu nehmen, für Motoren $(1 - \varepsilon')$.

$$92. \qquad \frac{r\, t}{L} = \frac{2\, D\, \beta \,.\, p_1\, \gamma\, \varepsilon\, B}{D_1 \,.\, J \,.\, U'\, (1 \pm \varepsilon')\, q}.$$

Die Formeln 90 und 92 gestatten auf verhältnismässig einfache Weise, den Quotienten $\frac{r\, t}{L}$ aus den Dimensionen einer Maschine zu berechnen. Da ferner die entsprechenden Werte von

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} \text{ und } e^{+\frac{r}{L} t}$$

der Tabelle XI entnommen werden können, so genügen diese Formeln bereits, um gewünschtenfalles den Strom auszurechnen, welcher bei irgend einer Bürstenverschiebung unterbrochen wird.

C. Die Bürstenverschiebung.

Einen wichtigen Faktor für die Beurteilung einer Maschine bildet das Verhältnis der Bürstenverschiebung a (siehe Fig. 114) zum Abstande c der neutralen Zone von der Polspitze. Je mehr sich dieses Verhältnis der Einheit nähert, desto schwieriger wird das Einstellen der Bürsten, weil die geringste Bürstenverschiebung von bedeutendem Einflusse auf die Spannung E_2 ist. Wir ersehen dies aus dem Verlauf der Kurve E_2 in Fig. 114. Wir werden in der Tabelle Seite 194 sehen, wo sich die Grenzen für einen funkenlosen Gang befinden.

Es soll nun an Hand der Fig. 114 die Kraftliniendichte in einem beliebigen Punkte G für eine Bürstenverschiebung a abgeleitet werden.

Dieser Punkt steht unter der Einwirkung zweier Pole. Steht B für die maximale Sättigung direkt unter dem Pole, so ist für den Punkt G

93. $$B' = B \frac{\delta}{\xi (c - a) + \delta} - B \cdot \frac{\delta}{\xi (c + a) + \delta}.$$

Dieser Wert, in die Gleichung $\eta = \frac{E_2}{E_1}$ eingesetzt, ergibt mit Umgehung der Zwischenrechnungen:

$$\eta = \frac{\delta \, a \, \xi \, (1 \pm \varepsilon')^2}{[(\delta + \xi \, c)^2 - \xi^2 \cdot a^2] \, \beta \, \varepsilon},$$

woraus sich mit Umkehrung des Zeichens sofort a bestimmen lässt.

94. $$a = \sqrt{M^2 + \left(c + \frac{\delta}{\xi}\right)^2} - M.$$

95. $$M = \frac{\delta \, (1 \pm \varepsilon')}{\xi \, \beta \, \varepsilon \, \eta}.$$

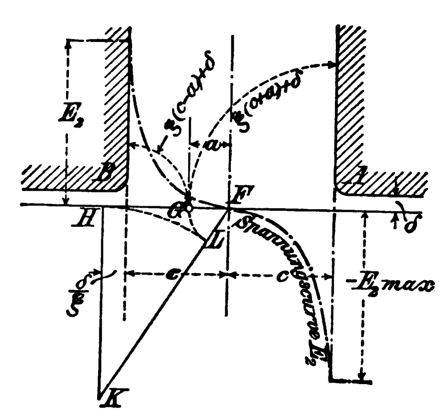


Fig. 114.

δ, ξ und β sind durch die Dimensionen der Maschine gegeben, ε und ε', welch' letzteres wir der Einfachheit halber approximativ gleich $2 \, \varepsilon$ setzen, hängt vom Spannungsverlust der Maschine ab und η wird aus Tabelle XI entnommen.

Wollte man a auf graphischem Wege bestimmen, was in vielen Fällen von Vorteil ist, so genügt es,

$$F H = \left(c + \frac{\delta}{\xi}\right)$$

$$\text{und } H K = M$$

zu machen und den Punkt K mit F zu verbinden. Schlagen wir M nach $K F$ über, so ist $L F = G F$ die gesuchte Bürstenverbindung.

Laufende Nummer	…1	γ cm	ε i. heiss. Zustand	D_1 cm	J	U'	$1 \pm \varepsilon'$	q	$\frac{r}{L}t$	η
1	1	0,9	0,016	50	125	0,2	1,03	2	**2,9**	**1,12**
2	1	1	0,035	11	50	0,2	1,07	4	**7,7**	**1,01**
3	1	0,8	0,023	35	24	0,2	1,05	8	**4,6**	**1,02**
4	1	1,0	0,04	13,5	100	0,2	1,08	3	**6,7**	**1,01**
5	1	1,0	0,042	20	200	0,2	1,08	2	**4,0**	**1,03**
6	1	1,0	0,06	26	20	0,2	0,88	12	**9,3**	**1,00**
7	2	1,5	0,023	30	160	2,3	0,95	4	**1,06**	**2,07**
8	2	2,5	0,02	68	370	2,3	1,04	2	**0,85**	**2,5**
9	2	1,2	0,021	26	400	2,3	1,04	2	**0,445**	**4,5**
10	2	3	0,016	170	7500	0,2	1,03	2	**2,2**	**1,27**
11	1	1,1	0,04	20	320	2,3	1,08	1	**0,97**	**2,2**
12	1	1,8	0,02	90	150	0,2	0,96	3	**6,2**	**1,015**
13	1	1	0,048	25	30	3	0,90	12	**0,735**	**2,85**
14	1[3)]	1,2	0,026	32	180	3	1,06	4	**0,254**	**7,9**
15	3	1,7	0,026	27	1000	3,5	1,05	1	**0,75**	**2,8**
16	1	0,8	0,053	11,5	20	2,3	1,1	8	**1,04**	**2,1**
17	1	1,0	0,048	12,5	36	2,3	1,1	8	**0,536**	**3,8**
18	1	0,8	0,030	15	80	2,3	1,06	4	**0,35**	**5,8**
19	1	2,0	0,035	18	1000	3,5	1,1	1	**0,175**	**11,5**
20	1	1,0	0,036	24	400	2,3	1,07	2	**0,298**	**6,8**
21	1	1,0	0,04	29	500	2,3	1,08	2	**0,191**	**10**

…nstifte vorhanden sind, gleich 1 zu setzen, wegen der Seriewicklung.

Die Gleichung 94 lässt erkennen, dass bei Maschinen mit sehr geringem Luftabstand $\frac{\delta}{\xi}$ gewöhnlich gegenüber c vernachlässigt werden kann.

In der nebenstehenden Tabelle, sowie derjenigen S. 194, sind eine grössere Zahl von Konstruktionsdaten ausgeführter Maschinen aller möglichen Konstruktionen enthalten, welche mir von verschiedenen Fabrikanten in freundlichster Weise zur Verfügung gestellt wurden und die ich in gewissenhaftester Weise benutzt habe.

Hiebei ist zu bemerken, dass die Reihenfolge in durchaus vorurteilsfreier Weise, gestützt auf eigene Beobachtungen des Verfassers, sowie des mit den Versuchen betrauten Personals nach der Güte der Maschine erfolgt ist, mit Ausnahme der Maschinen 1—8, bei welchen eine Klassifikation nach der Güte unmöglich war, und die infolgedessen nach der Grösse $\frac{a}{c}$ geordnet sind.

Von diesen Maschinen liefen Nr. 1—8 sehr gut, Nr. 9*)—11 gut, Nr. 12—17 mittelmässig, und Nr. 18—21 waren in der angegebenen Ausführung überhaupt unbrauchbar und mussten vollständig umgeändert werden.

Dieses Resultat stimmt im allgemeinen auch ziemlich gut mit der Rechnung bezw. der Grösse des Wertes $\frac{a}{c}$ überein, und es ist auch leicht, die wenigen Abweichungen davon auf ihre natürlichen Ursachen zurückzuführen, resp. zu korrigieren. Wir haben nämlich bisher den Kontaktwiderstand der Bürsten vernachlässigt. Dies mag bei Maschinen mit Metallbürsten wohl angehen, dagegen muss bei Kohlenbürsten eine Korrektur angebracht werden.

Versuche von Guilbert und Giles ergaben folgende Übergangswiderstände reduziert auf einen Quadratmillimeter Bürstenfläche.

Commutatorgeschwindigkeit in m/sec	Übergangswiderstand
0	ca. 1 Ω
6	„ 2 Ω
12	„ 5 Ω

*) Mit Kohlenbürsten läuft die Maschine Nr. 9 absolut ohne Funken.

Tabelle der Werte von a (nach Gleichung 95) und $\frac{a}{c}$.

Laufende Nummer	G = Generator M = Motoren	$\frac{rt}{L}$	η	ξ	β	ε	δ	$(1 \pm \varepsilon')$	M	c	$\frac{\delta}{\xi}$	$\sqrt{M^2+\left(c+\frac{\delta}{\xi}\right)^2}-M$	a	$\frac{a}{c}$
1	G	2,9	1,12	2,1	0,78	0,016	1,4	1,08	52,5	4,95	0,66	52,75 — 52,5	0,25	0,05
2	G	7,7	1,01	2	0,75	0,035	0,95	1,07	19,2	4,8	0,475	20 — 19,2	0,8	0,167
3	G	4,6	1,02	3	0,84	0,023	1	1,05	17,8	6,4	0,33	19 — 17,8	1,2	0,187
4	G	6,7	1,01	2	0,72	0,04	1	1,08	18,5	6,85	0,50	19,8 — 18,5	1,3	0,205
5	G	4,0	1,03	2	0,65	0,042	1,5	1,08	29	11,5	0,75	31,5 — 29	2,5	0,218
6	M	9,3	1,00	1,8	0,55	0,06	1,4	0,88	20,7	6,7	0,78	22 — 20,7	1,4	0,21
7	M	1,06	2,07	2	0,75	0,023	0,3	0,95	4	4,85	0,15	6,4 — 4	2,4	0,495 [1]
8	G	0,85	2,5	2,5	0,74	0,02	1	1,04	11,3	11,7	0,40	16,5 — 11,3	5,2	0,445 [2]
9	G	0,445	4,5	2,1	0,615	0,021	0,75	1,04	6,4	8,35	0,357	10,8 — 6,4	4,4	0,525
10	G	2,2	1,27	1,6	0,64	0,016	2,45	1,08	119	5,6	1,53	119,21 —119	0,21	0,04
11	G	0,97	2,2	2,3	0,66	0,04	0,6	1,08	4,85	5,5	0,26	7,53 — 4,85	2,68	0,49
12	M	6,20	1,015	1,8	0,72	0,02	2	0,96	17,8	6,6	1,11	19,4 — 17,8	1,6	0,242
13	M	0,785	2,85	2,1	0,63	0,04	0,2	0,92	1,22	6	0,095	6,308— 1,22	5,088	0,85 [3]
14	G	0,254	7,9	1,6	0,85	0,026	0,5	1,06	1,9	3	0,31	3,83 — 1,9	1,93	0,645
15	G	0,75	2,8	2,1	0,78	0,026	0,15	1,05	1,41	3,4	0,071	3,74 — 1,41	2,33	0,685
16	G	1,04	2,1	2,85	0,51	0,053	0,85	1,1	2,88	6,9	0,15	7,63 — 2,88	4,75	0,69
17	G	0,536	3,8	2,35	0,51	0,048	0,4	1,1	2,0	6,9	0,17	7,35 — 2	5,35	0,775
18	G	0,35	5,8	2,35	0,49	0,03	0,4	1,06	2,1	9,6	0,17	10 — 2,1	7,9	0,823
19	G	0,175	11,5	2	0,87	0,035	0,4	1,1	0,63	2,55	0,20	2,82 — 0,63	2,19	0,86
20	G	0,298	6,8	3,2	0,76	0,036	0,3	1,07	0,54	7,5	0,10	7,619— 0,54	7,08	0,945
21	G	0,191	10	3,2	0,7	0,04	0,6	1,08	0,72	15	0,19	15,2 — 0,72	14,48	0,965

[1]) Mit Berücksichtigung des Kontaktwiderstandes u. s. w. 0,247. (Seite 201.)
[2]) „ „ „ „ „ 0,29. (Seite 195.)
[3]) „ „ „ „ „ 0,65. (Seite 201.)

Diese Zahlen erscheinen ungewöhnlich gross, offenbar eine Folge des schlechten Materiales der benutzten Commutatorlamellen (Bronce), ferner sind die Versuche bei kaltem Zustande der Kohlen ausgeführt, während bekanntlich der Widerstand mit der Temperatur bedeutend abnimmt. Wir nehmen hier nur die Hälfte dieses Widerstandes an.

Eine gewisse Unzuverlässigkeit liegt noch in der Bestimmung der Auflagfläche, da sich dieselbe fortwährend ändert, es sei im Mittel der halbe Querschnitt eingesetzt.

Bei Maschine Nr. 8 haben die Bürsten 5250 $\%m^2$ Auflagfläche; die Umfangsgeschwindigkeit beträgt ca. 11 m/. Es ist folglich der Widerstand beim 2maligen Übergang

$$= \text{ca. } \frac{2 \, . \, 2{,}5}{2625} = 0{,}002 \; \Omega,$$

während der Spulenwiderstand $= 0{,}00188 \; \Omega$ ist. Der Widerstand erhöht sich folglich um 100 %; daher ist

$$\frac{r\,t}{L} = 2 \, . \, 0{,}85 = 1{,}7;$$

$$\eta = 1{,}4 \text{ (nach Tab. XI)};$$

$$a = 3{,}4 \text{ \%m};$$

$$\frac{a}{c} = \mathbf{0{,}29}.$$

Bei den Motoren Nr. 7 u. 13 lässt sich der Quotient $\frac{a}{c}$ aus einem anderen Grunde bedeutend vermindern, der in dem nachfolgenden Kapitel näher auseinander gesetzt ist.

Der Maschine Nr. 10 kann das Prädikat „sehr gut“ aus dem leicht erklärlichen Grunde nicht gegeben werden, weil das genaue Einstellen der 24 Bürstenstifte mit 144 Bürsten etwas unverständlich war. Nichtsdestoweniger war es möglich, mit etwelcher Routine einen nahezu funkenlosen Gang zu erreichen.

Die Dynamo Nr. 12 lief im allgemeinen gut, dagegen machte sich hier ein gewisser Übelstand insofern geltend, als die Spannungsdifferenzen zwischen zwei Commutatorsegmenten etwas zu gross war, so dass zeitweise ein „Funken“ rings um den Commutator auftrat.

In einem solchen Falle ist die Anwendung von Kohlenbürsten nicht mehr ratsam.

Diesem Umstande konnte selbstverständlich in den aufgeführten Formeln nicht Rechnung getragen werden.

Bei den Maschinen Nr. 20 und 21, deren Daten bereits in einem früheren Aufsatze des Verfassers (s. „E T Z" 1893, Heft 5) mitgeteilt wurden, stimmt die Rechnung der Bürstenverschiebung sehr genau mit dem Versuche überein.

Nr.	Bei Ampère	Bürstenverschiebung nach Versuch	Bürstenverschiebung nach Rechnung
20	250	15°	15,1°
21	500	27°	26,6°

D. Funkenbildung.

Dass Bürstenverschiebung und Funkenbildung in einem engen Zusammenhange zu einander stehen, ist eine durch die Erfahrung genügend bekannte Thatsache. Sie lässt sich aber auch durch die Theorie erklären.

Ohne uns allzusehr ins Gebiet des Imaginären zu verlieren, dürfen wir jedenfalls analog den Beobachtungen an gewöhnlichen Ausschaltern die Hypothese aufstellen: Die Grösse der Funkenbildung hängt in einem bestimmten direkten Verhältnisse von der Energie ab, welche unterbrochen wird und in einem noch nicht genau bekannten umgekehrten Verhältnisse von der Geschwindigkeit, mit welcher der Unterbruch stattfindet. Alles was wir mit Bezug auf die letztere wissen, ist, dass dieselbe mit der Potenz des Widerstandes wächst (vergl. Fig. 111). Da nun im Momente, wo der Kurzschluss aufgehoben wird, der ganze Armaturwiderstand + Luftwiderstand des Lichtbogens eingeschaltet ist, so können wir uns hieraus ungefähr einen Begriff machen, mit welcher fabelhaften Geschwindigkeit sich dieser Vorgang vollzieht, und es ist leicht einzusehen, warum Commutatoren weniger feuern, als gewöhnliche Ausschalter.

Da also zur Bildung von Funken notwendiger Weise ein Energiewechsel*) vorausgesetzt werden darf, und es anderseits nach dem bisher Gesagten stets möglich sein soll, eine Bürstenstellung zu finden, bei welcher kein Energiewechsel stattfindet, unter der Bedingung, dass $a < c$ ist, so scheint es auf den ersten Blick unerklärlich, warum trotzdem bei den besten Maschinen noch kleine Funken auftreten können.

Der Grund hiefür ist einfach in der Veränderlichkeit des Bürstenkontaktes und der Ungleichheit des Widerstandes der Lötstellen zu suchen. Je mehr Lötstellen, desto grössere Neigung zur Funkenbildung, indem es absolut unmöglich ist, einen genau gleichen Widerstand an allen Segmenten zu erreichen, und zwar um so weniger, wenn die Maschine heiss wird. Bei vielen Maschinen ist dies übrigens schon durch die Art der Wicklung (z. B. Knäuelwicklung) ausgeschlossen.

Wenn also die Bürsten für die eine Lamelle richtig eingestellt sind, so trifft dies bei den nächsten vielleicht schon nicht mehr zu, und die Folge ist ein kleiner Funken.

Am besten sieht man die Ungleichheit der Lötstellen, wenn ein Commutator ungleich abgenutzt ist.

E. Korrektur der Bürstenverschiebung bei Motoren.

Wird die nämliche Maschine als Generator und als Motor laufen gelassen, so zeigt sich ein wesentlicher Unterschied in der Grösse der Bürstenverschiebung zur Erreichung eines funkenlosen Ganges, und zwar ist dieselbe beim Motor stets kleiner.

Diese Erscheinung erklärt sich zwar bereits schon zum Teil aus der Verschiedenheit der Vorzeichen von ε' in Gleichung 95; immerhin ist der Unterschied in Wirklichkeit bedeutender und dadurch hervorgerufen, dass durch die Drehung der Armaturaxe in den Drähten derselben eine Spannung E_a erzeugt wird, welche

---

*) Die Funkenbildung kann allerdings auch durch mechanische Mängel, wie Unrundlaufen des Commutators, Porosität der Lamellen u. s. w., gefördert werden, die sich einer Berechnung natürlich entziehen.

beim Generator die ursprüngliche Spannung E_1 vergrössert, beim Motor verringert. Während dieser Effekt jedoch beim Generator für gewöhnlich vernachlässigt werden kann, indem eine sehr kleine Bürstenverschiebung hinreicht, um eine grosse Änderung von E_2 hervorzubringen, ist für Motoren eine Korrektion der Rechnung notwendig.

Wir wollen zunächst die von der Armaturreaktion herrührende Kraftliniendichte B_a bestimmen (siehe Fig. 115). Greifen wir irgend einen Punkt im Abstande y von der Magnetaxe AB heraus, so steht derselbe, wie ersichtlich, unter der Einwirkung der sowohl links als rechts davon gelegenen Windungen.

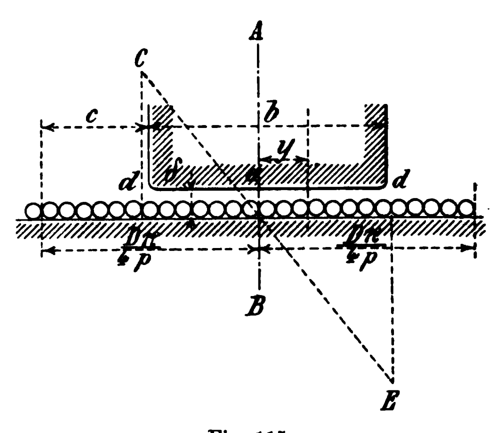


Fig. 115.

k sei die Anzahl aw pro %m und ferner werde angenommen, die Stromrichtung in den Drähten sei derart, dass die Kraftlinien im Sinne des Uhrzeigers kreisen.

An dem genannten Punkte wirken folglich $\left(\frac{D\pi}{4p} + y\right) k\, aw$ nach unten und $\left(\frac{D\pi}{4p} - y\right) k\, aw$ nach oben.

Die resultierende Magnetisierung ist daher gleich $2\, y\, k\, aw$, denen $\frac{4\pi}{10} \cdot 2\, y\, k\, \frac{1}{2\delta}$ Kraftlinien pro %m² entsprechen.

An den Polen wäre

$$B = \frac{4\pi}{10} \frac{1}{2\delta} 2bk \text{ (vergleiche Formel 18)}$$

und in der neutralen Zone schliesslich

$$B_a = \frac{4\pi}{10} \frac{JN}{4pp_1} \cdot \frac{1}{2\delta_1}.$$

Betreffend δ_1 siehe Fig. 110.

Ist B_a bekannt, so berechnet sich hieraus bei der Umfangsgeschwindigkeit v nach Gleichung 1

$$E_a = \frac{B_a}{10^8} \cdot l \frac{N}{N_2} \cdot v.$$

In dieser Gleichung ist v eine Variable, wie wir aus Fig. 112 sehen. Wir können jedoch dafür schreiben:

$$v = \frac{D\pi n}{60} \cdot \frac{tg\,\alpha_1}{tg\,\alpha} = \frac{D\pi n}{60} \cdot \frac{\frac{d(E_1' - E_2')}{dt}}{\frac{-2E_1}{t}}.$$

Unter der Bedingung, dass die Bürsten für den funkenlosen Gang eingestellt sind, also $E_1' - E_2' = -E_1$ ist daher gerade vor dem Kurzschluss

$$\frac{-t}{2E_1} \cdot \frac{d(E_1' - E_2')}{dt} = e^{-\frac{r}{L}t} \cdot \frac{rt}{L} \cdot \frac{E_1 + E_2}{2E_1}$$

$$= e^{-\frac{r}{L}t} \cdot \frac{r}{L} t \left(\frac{1+\eta}{2}\right).$$

Wir bezeichnen diesen Ausdruck mit X. Mit den nötigen Vereinfachungen findet man dann

$$E_a = \frac{\pi}{10} \frac{JNE}{\beta\delta_1 pBN_2} X$$

oder

96. $$\frac{E_a}{E_1} = \frac{0{,}157 \cdot JN}{\beta\delta_1 \cdot \varepsilon pp_1 B} \cdot X.$$

Tabelle der Werte von $e^{-\frac{r}{L}} \cdot \frac{r\,t}{L}\left(\frac{1+\eta}{2}\right) = X.$

η	X	η	X
1	0	3	0,69
1,01	0,04	3,5	0,74
1,02	0,05	4	0,78
1,05	0,09	5	0,81
1,1	0,15	6	0,84
1,2	0,24	7	0,85
1,4	0,36	8	0,87
1,6	0,44	9	0,88
1,8	0,50	10	0,89
2	0,55	15	0,92
2,5	0,63	20	0,99

Aus der obigen Tabelle geht hervor, dass die Geschwindigkeit um so regelmässiger wird, je grösser η ist; schon für $\eta = 20$ kann dieselbe als konstant angenommen werden.

Zwei Beispiele mögen genügen; gleichzeitig soll auch hiebei dem Kontaktwiderstand Rechnung getragen werden.

Beispiel I. Bei dem Motor Nr. 7 ist die Bürstenauflagfläche = $1200 \ {}^{m}\!/_{m}{}^{2}$, Umfangsgeschwindigkeit am Kommutator = rund $7 \ {}^{m}\!/$.

$$\text{Kontaktwiderstand} = \text{ca. } \frac{2 \cdot 1{,}2}{600} = 0{,}004 \ \Omega.$$

$$\text{Widerstand der Spule} = 0{,}0046 \ \Omega.$$

$$= 0{,}0086 \ \Omega.$$

Widerstandszunahme = $87\,\%$.

$$\frac{r\,t}{L} = 1{,}87 \cdot 1{,}06 = 1{,}98,$$

$$\eta = 1{,}3, \quad \text{(Tab. XI)}$$

$$X = 0{,}3.$$

$$\frac{E_a}{E_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}157 \cdot 520 \cdot 160}{0{,}75 \cdot 9{,}7 \cdot 0{,}023 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 8600} \cdot 0{,}3 = 0{,}34.$$

Anmerkung. $\frac{E_a}{E_1}$ ist hier nur halb so gross, wie Gleichung 95 angibt, da zwei getrennte Wicklungen vorhanden sind.

$$\eta' = 1,3\,(1 - 0,34) = 0,86,$$

$$M = \frac{0,3 \,.\, 0,95}{2 \,.\, 0,75 \,.\, 0,023 \,.\, 0,86} = 9,6,$$

$$a = 1,2,$$

$$\frac{a}{c} = \mathbf{0,247}.$$

Beispiel 2. Motor Nr. 13: Kontaktfläche der Kohlen = *600* $^{m}/_{m}{}^{2}$.

Der Widerstand einer Spule	= *0,0224* Ω.
Kontaktwiderstand (siehe Tab.)	= *0,007* Ω.
	= *0,0294* Ω.

Zunahme 30 %.

Folglich

$$\frac{r\,t}{L} = 1,31 \,.\, 1,076 = 0,96,$$

$$\eta \text{ (nach Tab. XI)} = 2,2,$$

$$X = 0,58,$$

$$\frac{E_a}{E_1} = \frac{0,157 \,.\, 30 \,.\, 706}{0,63 \,.\, 12 \,.\, 0,04 \,.\, 2 \,.\, 7400}\, 0,58 = 0,43.$$

Daraus wird

$$\eta' = 2,2\,(1 - 0,43) = 1,25$$

und

$$M = \frac{0,2 \,.\, 0,92}{1,25 \,.\, 2,1 \,.\, 0,63 \,.\, 0,04} = 2,78.$$

$$a = 3,92 \; ^{c}/_{m},$$

$$c = 6,$$

$$\frac{a}{c} = \mathbf{0,65} \text{ statt } 0,85.$$

F. Quermagnetisierung und Spannungsabfall.

Bisher war ausschliesslich die Rede von den Ursachen der Bürstenverschiebung und Funkenbildung. Wir haben hiebei gesehen, welchen Einfluss die sogenannte Quermagnetisierung, d. h. die in der Armatur erzeugten Kraftlinien, in der Richtung der neutralen Zone auf die Bürstenverschiebung ausüben. Es verbleibt uns, hier noch kurz auf eine weitere Erscheinung einzutreten,

nämlich den damit in Verbindung stehenden Spannungsabfall bei Generatoren oder Tourenverminderung bei Motoren.

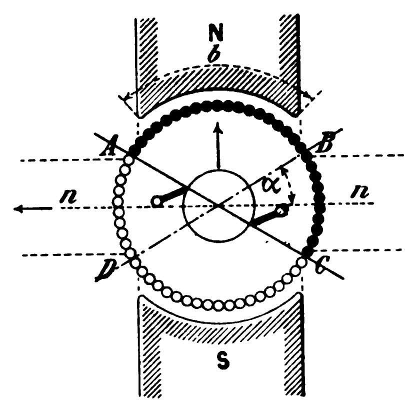


Fig. 116.

Betrachten wir die Richtung der Ströme in den Armaturdrähten und ihre magnetisierende Wirkung bei einer bestimmten Bürstenverschiebung α, so lässt sich die Armaturwicklung augenscheinlich durch zwei getrennte Spulen ersetzt denken, wovon die erste $ADBC$ Kraftlinien in der Richtung der Magnetaxe (Längs-Magnetisierung), die andere $ABDC$ senkrecht zur Magnetaxe (Quermagnetisierung) erzeugt.

Die Folge davon ist:

1. ein direkter Spannungsabfall, indem von den auf einen Pol entfallenden Drähten nur der zwischen AB gelegene Teil zur Geltung kommt. Da es sich jedoch nur um verhältnismässig geringe Spannungen handelt, welche von den Streulinien herrühren, so ist dieser Verlust nicht bedeutend;
2. ein indirekter Spannungsabfall, herbeigeführt durch Entmagnetisierung der Magnete um den Betrag $\frac{\alpha}{360} \frac{JN}{p p_1}$ pro magnetischen Stromkreis*).

Zu bemerken ist, dass der Spannungsabfall in Wirklichkeit noch vergrössert wird, weil durch die ungleiche Magnetisierung der Polstücke eine Verringerung der Permeabilität eintritt.

Um die Längsmagnetisierung möglichst zu vermindern, muss folglich der Winkel α verkleinert werden; die Mittel hiefür sind bereits bekannt.

Zur Verminderung der Quermagnetisierung hat der Verfasser

*) Bei Motoren tritt das Gegenteil ein, ihre Tourenzahl wird dadurch verringert.

schon vor Jahren eine Reihe von Mitteln vorgeschlagen, welche seither in der Praxis häufig Anwendung gefunden haben (siehe 1. Auflage, März 1891, 2. Auflage, Jan. 1892; Elektrotechnische Zeitschrift, 3. Febr. 1893; Lumière Electrique, Juni 1893; Teknisk Tidskrift, März 1893; Electrician, Mai 1893 etc.).

Dieselben lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

1. direkt wirkende,
2. indirekt wirkende.

Zu der ersten Klasse gehört eine Kompensationswicklung, welche auf den Magneten derart angebracht wird, dass ihre magnetische Axe mit derjenigen der Armatur zusammenfällt, jedoch mit umgekehrter Richtung der Kraftlinien (Fig. 117, s. Seite 153, 2. Auflage).

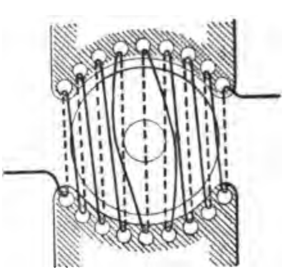


Fig. 117.

Eine analoge Anordnung wurde von Prof. Ryan drei Vierteljahre nach den ersten Veröffentlichungen des Verfassers*) angegeben. Die resultierende Wirkung ist hier gleich der Differenz der *aw* der Armatur weniger denjenigen der Kompensationswicklung. Vom praktischen Standpunkte aus lassen sich gegen diese Anordnung gewichtige Einwendungen erheben, indem eine konstruktive Ausführung sozusagen nur bei Maschinen mit sehr grossen Stromstärken von mehreren Tausend Ampère erreichbar ist, wobei eine einzige Windung genügt, so dass sämtliche Stäbe parallel geschaltet werden können.

Der Verfasser hat daher eine modifizierte Anordnung für nur teilweise Kompensation vorgeschlagen und auch probiert, deren verschiedene Varianten aus den Fig. 118—120 ersichtlich und ohne weiteres verständlich sind. Bei Fig. 120 ist die Wicklung behufs leichterer Montage nach beiden Seiten zurückgeschlagen. Die erste Maschine nach diesem Systeme lief bereits im November 1891 mit vorzüglichem Resultat. Selbstverständlich muss diese Kompensationswicklung vom Hauptstrom durchflossen sein.

*) Sibley Journal of Eng., Oct. 1892.

Es mag an dieser Stelle auch eine Anordnung von Swinburne erwähnt werden, welche auf den ersten Anblick dem gleichen Zwecke

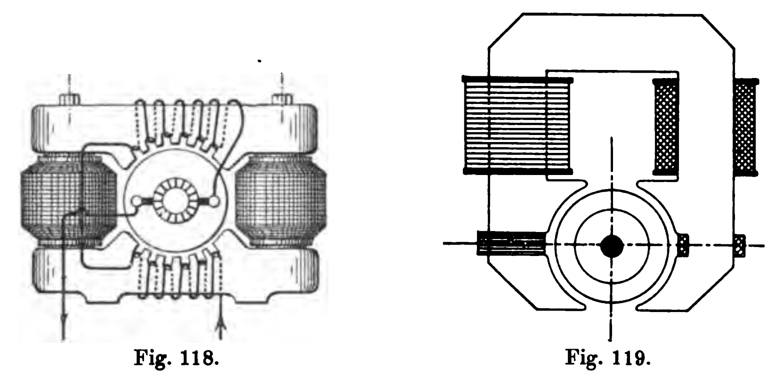


Fig. 118. Fig. 119.

zu dienen scheint, in Wirklichkeit aber eine andere Bestimmung hat. Dieselbe besteht (Fig. 121) aus zwei kleinen Hülfspolen von

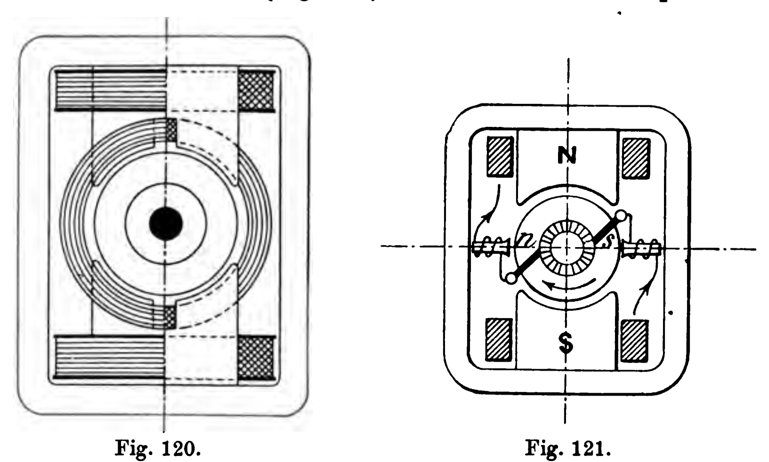


Fig. 120. Fig. 121.

entgegengesetzter Polarität als die Armatur, die vom Hauptstrome durchflossen sind und die nötige Induktion E_2 zum Umkehren des Stromes erzeugen. Es ist daher möglich, die Bürsten in ihrer ursprünglichen Lage zu lassen.

Ein besonderer Vorteil dieses Systems besteht darin, dass es sich leicht an einer ausgeführten Maschine anbringen lässt. Ich habe

seinerzeit Gelegenheit gehabt, die vorzügliche Wirkung dieses Apparates an einer Beleuchtungsmaschine im neuen Pier der American Line in New-York zu konstatieren und kann sie bestens empfehlen in Fällen, wo eine Maschine die gewünschte Leistung nicht ergibt.

Unter diese Kategorie mag auch die Wicklung von Sayers (Seite 36) gezählt werden. Die Berechnung derselben ist an Hand der gegebenen Formeln leicht ausführbar. Wir sehen aber gleichzeitig, dass sie einen gewissen Nachteil gegenüber der erstern besitzt. Ist dieselbe nämlich für den normalen Strom berechnet, so wird die Maschine zwar sehr gut und ohne Bürstenverschiebung bei dieser Belastung laufen, jedoch leicht zu feuern anfangen, wenn sie fast ganz entlastet wird.

Die indirekten Methoden zur Veringerung der Armaturreaktion beruhen darauf, durch geeignete Anordnung der Magnetfelder den magnetischen Widerstand der von der Armatur gebildeten Kraftlinien zu vergrössern, und zwar kann dies auf zweifache Weise geschehen.

1. Durch teilweise oder vollständige Trennung der magnetischen Stromkreise (Fig. 122—124). Vollständig ist dies bei der

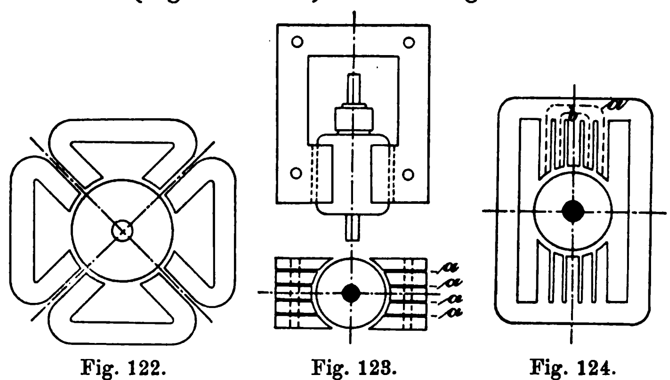


Fig. 122. Fig. 123. Fig. 124.

Maschine von F. Balas und L. Couffinshal, Saint-Etienne (Kap. VIII), durchgeführt, ferner bei einer Anzahl amerikanischer Maschinen, teilweise bei den Dynamos der Usine Joseph Farcot in Paris, entworfen vom Verfasser.

2. Durch Laminierung der Magnetpole parallel zur Richtung des inducierten Drahtes.

Die erste Maschine, welche der Verfasser nach diesem Systeme baute, lief bereits im Dezember 1890 in der Maschinenfabrik Oerlikon.

Es scheint, dass auch Prof. Silv. Thompson, unabhängig davon, auf die gleiche Idee gekommen ist.

Schlussfolgerungen.

Am Schlusse angelangt, können wir das Gesagte kurz in folgende, für die Konstruktion wichtige Regeln zusammenfassen:

a) Lötstellen sind möglichst zu verringern, und auf eine möglichst symmetrische und gleichmässige Wicklung zu trachten.

b) Die Zahl der Commutatorlamellen darf nicht zu klein sein, und hat sich nach der Grösse der Leistung zu richten. Speciell bei hochgespannten Maschinen ist darauf zu achten, dass die Spannung zwischen 2 Lamellen nicht über 30 bis 40 Volt im Maximum steigt. Für vielpolige Trommelwicklungen mit Serieschaltung gilt die nachstehende Gleichung zur Bestimmung der Spannung zwischen zwei Commutatorsegmenten

$$e = \frac{2\,p\,E}{N_2}.$$

Vielpolige Trommelwicklungen sind daher nicht sehr für Hochspannungsmaschinen geeignet.

c) Aus der Tabelle auf Seite 194 lässt sich der Schluss ziehen, dass eine Maschine um so besser ist, je kleiner der Quotient $\frac{a}{c}$.

Maschinen, bei welchen $\frac{a}{c} > 0{,}7 - 0{,}8$ ist, sind unbrauchbar oder zum mindesten sehr schlecht.

Wenn immer möglich, sollte $\frac{a}{c} <= 0{,}5$ sein.

Setzen wir beispielsweise $\frac{a}{c} = 0{,}7$ als Maximalwert in Gleichung 94 ein, so findet man

$$97. \quad \varepsilon_{max} = \frac{\delta\,(1 \pm \varepsilon')\,1{,}4}{(0{,}51\,c\,\xi + 2\,\delta)\,\beta\,\eta} = \text{approx.}\ \frac{\delta\,(1 \pm \varepsilon')}{0{,}5\,c\,\xi\,.\,\beta\,\eta},$$

η darf hiebei als konstant angenommen werden, da es kaum merklich mit dem Strom sich ändert, ε' muss geschätzt werden.

Von der Maschine Nr. 19 wissen wir beispielsweise, dass sie noch ziemlich gut bei der halben Belastung lief. Hier wäre

$$\varepsilon_{max} = \frac{0{,}4\,.\,1{,}05}{0{,}5\,.\,2{,}55\,.\,2\,.\,0{,}87\,.\,11{,}5} = 0{,}0165,$$

und

$$J = 1000\,.\,\frac{0{,}0165}{0{,}035} = 470 \text{ Ampère.}$$

d) Um $\frac{a}{c}$ klein zu erhalten, muss M möglichst gross sein. Die Gleichung 95 zeigt nun, dass dies erreicht wird, wenn man δ gross und ξ, β, ε und η klein macht.

Gibt daher eine Maschine Funken, so kann dem dadurch gesteuert werden, indem man die Ausbohrung vergrössert und eventuell die Polspitzen abstanzt, d. h. β verringert. Da sich jedoch dabei auch c vergrössert, so ist es ratsam, vorher durch eine kleine Berechnung zu prüfen, ob damit wirklich ein Vorteil erreicht wird.

Noch wirksamer sind natürlich die Methoden von Swinburne und Sayers, die soeben aufgeführt wurden.

e) Da η umgekehrt mit der Grösse $\frac{r}{L}\,t$ abnimmt, sollte der Commutatordurchmesser möglichst klein und die Zackenzahl umgekehrt gross gehalten werden; eventuell verteile man die Wicklung einer Spule auf 2 verschiedene Zacken. Ferner ist der Ohm'sche Verlust thunlichst zu reduzieren.

VII. Konstruktive Details.

A. Die Armatur.

1. Die Welle.

Der Verfasser hat wiederholt die Beobachtung gemacht, dass Dynamo-Wellen, welche nach den üblichen Konstruktionsregeln ausgeführt waren, nach verhältnismässig kurzer Zeit brechen. So sind ihm 5 Fälle bekannt, wo Wellen von Erregermaschinen nach geringer Betriebsdauer (14 Tage bis 1 Jahr) brachen, ohne dass sich diese Brüche auf Grund der Festigkeitslehre rechtfertigen liessen, indem die maximale Belastung weit unter der Bruchbelastung lag.

Vor zwei Jahren nun erschien eine hochinteressante Arbeit über das Arbeitsvermögen von Materialien von dem leider inzwischen verstorbenen Professor Friedr. Autenheimer, früherem Direktor des Technikums in Winterthur, worin die Festigkeitslehre von einem ganz neuen Gesichtspunkte aus gelehrt wurde. Der Verfasser hat sich seiner Zeit, durch die Notwendigkeit hiezu gezwungen, die Aufgabe gestellt, diese neue Theorie an einer grösseren Zahl von Wellenbrüchen zu kontrollieren und glaubt es dem Verdienste des grossen Mannes schuldig zu sein, wenn er hier die Grundzüge der Autenheimer'schen Theorie, soweit sich dieselbe auf Dynamowellen bezieht, wiedergibt.

(Genauere Angaben finden sich im Bulletin des Vereins ehemaliger Schüler des Technikums Winterthur, Mai 1894, ferner ib. Aufsatz von J. Fischer-Hinnen, Febr. 1895.)

Eine gewisse Reserve ist allerdings insofern zu machen, als sich diese Thesen auf Wellen von gleichbleibendem Durchmesser

beziehen, während bei den gewöhnlichen Dynamowellen gewisse Erfahrungskoefficienten, deren genaue Bestimmung leider vorderhand noch nicht möglich ist, zu Hülfe gezogen werden müssen.

Wir benutzen diese Theorie dennoch, weil sie einen viel genauern Einblick in die Natur der Materialbeanspruchungen als die gewöhnliche Festigkeitslehre gewährt.

Wird ein Stab von der Länge $\mathfrak{L}$ einem Zuge Z pro $^{c}/_{m}{}^{2}$ innerhalb der Elasticitätsgrenze ausgesetzt, so verstreckt sich derselbe um $\triangle \mathfrak{L}$ und es ist bekanntlich

$$\frac{\triangle \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} = \frac{Z}{E}.$$

$E =$ Elasticitätsmodul.

Die Arbeit, welche bei diesem Vorgange geleistet wird, ist

$$a = \frac{1}{2} \triangle L \cdot Z,$$

oder, indem man hierin den Wert von $\triangle \mathfrak{L}$ einsetzt,

$$a = \frac{1}{2} \frac{\mathfrak{L}}{E} \cdot Z^2.$$

Sobald nun der Zug aufhört, so nimmt der Stab wieder seine frühere Gestalt an, oder, besser gesagt, und hierin liegt gerade der Schwerpunkt der Autenheimer'schen Theorie, er wird dauernd um ein äusserst kleines, von Auge nicht bemerkares Stück verstreckt.

Dies wiederholt sich mit jedem Spannungswechsel, bis die totale Verstreckung schliesslich derjenigen der Bruchbelastung gleichkommt.

Nennt man $a' = K \frac{L}{E} Z^2$ das bei jedem Spannungswechsel verloren gegangene Arbeitsvermögen, so ist folglich das totale Arbeitsvermögen (berechnet aus der Bruchspannung und der Verstreckung)

$$A = N \cdot a',$$

worin N die Anzahl Spannungswechsel bezeichnet, welche der Stab bis zum Bruch aushalten kann.

Variiert die Spannung zwischen Z_1 und Z_2 (bei Dynamowellen ist Z_1 gleich der kombinierten Beanspruchung aus Torsions- und Biegungsmoment und Z_2 gleich der Torsionsbeanspruchung), so findet Autenheimer mit Berücksichtigung der Zeitdauer eines Spannungswechsels für Wellen gleich bleibenden Durchmessers

$$100. \qquad A = c \,.\, N \,.\, \frac{Z_1^2 - Z_2^2}{E} \,.\, t.$$

A = Arbeitsvermögen pro $\%_{m}^{3}$ in Kgm. = *7,2* für schmiedeiserne Wellen und *6,3* für Wellen aus Kruppstahl,
c = *0,00094* für Schmiedeisen,
= *0,00055* für Gussstahl,
N = Anzahl totale Spannungswechsel, welche die Welle bis zu ihrem Bruche aushalten kann, gleich doppelte Zahl Touren,
E = *1800000* für Schmiedeisen,
= *2100000* für Stahl,
t = Zeit eines Spannungswechsels in Stunden ausgedrückt.

Für Wellen mit verschiedenem Durchmesser ist, je nachdem sich die Abstufung mehr oder weniger stark vollzieht, die linke Seite durch einen Koefficienten zu dividieren, der zwischen 40—10 variiert. Versuche, welche Wöhler vor einigen Jahrzehnten an Wellen von scharfen Abstufungen ausführte, zeigten nämlich die eigentümliche Erscheinung, dass die Lebensdauer derselben je nach Umständen um das 10—40 fache geschwächt wurde, gegenüber solchen mit gleichbleibendem Querschnitt. Wenn wir diesem Umstande durch den Koefficienten 20 Rechnung tragen, so mag diese Zahl allerdings etwas rund erscheinen, es ist jedoch zu bedenken, dass der Wellendurchmesser nur mit der sechsten Wurzel desselben zusammenhängt. Würden wir also den Koefficienten zweimal zu gross oder zu klein annehmen, so hätte dies einen Fehler von 10 % + oder — zur Folge.

Die Gleichung 102 zeigt, dass für die Berechnung der Betriebsdauer nicht die maxiale Spannung Z_1, sondern die Differenz $Z_1^2 - Z_2^2$ von Bedeutung ist.

Berechnet man nun die Differenz der Quadrate $Z_1^2 - Z_2^2$ für verschiedene Stellen der Welle, so zeigt sich die durch die Erfahrung häufig bestätigte Thatsache, dass bei Gleichstrommaschinen Wellenbrüche gewöhnlich zwischen dem Commutator und der Armaturnabe, d. h. an einer Stelle eintreten*), wo das Torsionsmoment gleich Null ist; mit andern Worten: Bei der Berechnung von Dynamowellen kommt nicht das Torsionsmoment, sondern das Biegungsmoment in Betracht.

Eine grosse Anzahl Maschinen von 7—260 HP zeigten nun, dass im Mittel

$$Z_1 = 79000 \frac{PS}{n} \cdot \frac{1}{d^3} \text{ und}$$

$$Z_2 = 0 \text{ gesetzt werden darf;}$$

$$PS = \text{Pferdestärken,}$$

$$n = \text{Tourenzahl; ferner ist}$$

$$t = \frac{1}{2 \cdot n \cdot 60}.$$

Diese Werte, in Gleichung 100 eingesetzt, ergeben, wenn man die durchschnittliche Dauer einer Welle zu 30 Jahren annimmt:

Für schmiedeiserne Wellen:

$$101. \qquad d \text{ in } \%_m = 20 \sqrt[3]{\frac{P \cdot S}{n}} = 23 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Für Stahlwellen:

$$102. \qquad d \text{ in } \%_m = 18 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 21 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Anmerkung. d bedeutet den Durchmesser an der schwächsten Stelle, d. h. in der Collectorbüchse; die Dimensionen der Welle im Lager können etwas geringer gehalten werden.

---

*) Siehe auch American Machinist, Nr. 47, 22. Nov. 1894. Der dort angegebene Wellenbruch liess sich ebenfalls mit ziemlicher Sicherheit nach der Autenheimer'schen Theorie berechnen.

Beispiele über die Formeln 101 und 102.
(Dynamos der Maschinenfabrik Oerlikon.)

PS	n	d berechnet	d ausgeführt	
7,1	1200	33 $^{m}/_{m}$	40 $^{m}/_{m}$	Stahlwellen.
15,5	1000	45	50	
30	900	58	56	
59	700	79	75	
95	500	105	100	
260	260	180	140*)	

Die Formeln 101 und 102 ergeben im allgemeinen für sehr kleine Kräfte zu schwache, für sehr grosse zu dicke Wellen. Kleinere Wellen müssen in der That etwas stärker gehalten werden, weil hier der magnetische Zug, hervorgerufen durch konstruktive Mängel oder unrichtige Magnetanordnung, von viel grösserem Einflusse ist, als bei grossen.

Es kann nicht schaden, sich diesen magnetischen Zug an Hand einer 4 poligen Maschine etwas genauer anzusehen.

Nehmen wir an, das Centrum der Armatur sei aus irgend einem Grunde um den Betrag δ' (in $^{m}/_{m}$) aus dem Ausbohrungscentrum verschoben.

Berechnet man für diesen Fall die Kraftliniendichten an den verschiedenen Polen und daraus mit Hülfe der Gleichung 79 die Zugkräfte, so findet man einen **resultiven magnetischen Zug****).

103. $$Z = \frac{1}{7800000} \frac{\delta' \cdot \Phi^3}{S_l^2 \cdot \mathfrak{J} m} \cdot {}^{k}/_{g},$$

oder, indem man ganz approximativ

$$\Phi = 2200\, D^2,$$

*) Diese Welle hat sich während dem Betrieb durch eine starke Ausbiegung als zu schwach erwiesen.

**) Wir wollen uns hier die Zwischenrechnungen, die im übrigen höchst einfach sind, ersparen. Dieselben finden sich in dem bereits erwähnten Bulletin des Vereins ehemaliger Schüler des Technikums Winterthur. Febr. 1895.

$$\mathfrak{J}m = 250\,D \text{ und}$$
$$S_1 = 0{,}4\,D^2 \text{ setzt,}$$
$$Z = 34\,D\,.\,\delta'.$$

Da das Gewicht einer Armatur nahezu mit der dritten Potenz des Durchmessers wächst, während der magnetische Zug nur im einfachen Verhältnis steht, wird folglich dessen Einfluss mit zunehmendem Durchmesser verschwindend klein.

(Siehe Tabelle auf der folgenden Seite.)

Die Dimensionen der übrigen Teile der Welle richten sich nach dem Durchmesser im Commutator.

Der Durchmesser in der Wellenmitte ist gewöhnlich einige m/m grösser, als der erstere. Für die Wellendicken in den Lagern sind die Lagerdistanzen und die Höhe der Lagerläufe massgebend. Ganz approximativ mag der Durchmesser in der Wellenmitte

bei kleinen Maschinen = *1,3—1,4* mal Lagerdurchmesser,

„ grossen „ = *1,1—1,2* „ „

des Lagers gegen die Riemenscheibe sein.

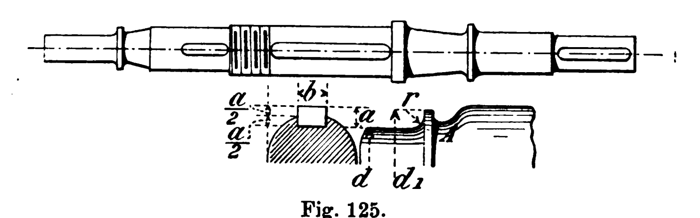


Fig. 125.

Die Hohlkehlen auf der inneren Seite der Lagerläufe müssen gehörig tief und breit gemacht werden, weil sich sonst leicht das Öl der Welle nachzieht; so konnte bei einem Lager mit kleinem Ölbehälter beobachtet werden, dass sich dasselbe aus dem angegebenen Grunde innert kaum 5 Minuten entleerte.

Die V e r k e i l u n g kann entweder mit einem einzelnen grössern oder mit zwei kleinern Keilen erfolgen, letzteres hauptsächlich, wenn die Nabe aus Bronce ist und ihre Dicke deshalb, mit Rücksicht auf die Kosten, reduziert wird.

Tabelle ausgeführter Dynamowellen.

PS	n	$\frac{PS}{n}$	$\sqrt[3]{\frac{PS}{n}}$	Durchmesser Wellenmitte d_1 m/m	Durchmesser im gross. Lager d_2 m/m	Lagerlänge l m/m	$\frac{l}{d_2}$	C_1 *)	Bemerkungen
2200	75	29,4	3,1	610	—	—	—	19,7	Tramwaygenerator 1500 KW. Westend Co., Boston.
5000	250	20	2,71	—	ca. 320	ca. 625	1,96	—	Vertikale Westinghouse-Dynamo, Niagara.
600	60	10	2,15	600	400	650	1,63	28	Wechselstr.-Dyn. Farcot, Secteur des Champs Elysées Paris.
700	100	7	1,92	457	—	—	—	23,8	Type MB 10 — 500 — 100 Thompson-Houston.
600	110	5,45	1,76	300	—	—	—	17	Type JL 18, Schuckert.
700	150	4,66	1,67	240	—	—	—	14,5	Vertik. Aluminium-Dynamo Oerlikon.
325	110	2,95	1,43	—	250	700	2,8	—	„ △ Dynamo Bremgarten (Oerlikon).
220	85	2,6	1,37	360	—	—	—	26	Tramwaygenerator Basel (Alioth).
500	200	2,5	1,36	—	230	500	2,18	—	Vertik. Wechselstrom-Dynamo La Goule (Oerlikon).
600	300	2	1,26	—	160	500	3,13	—	Fives-Lille (Désiré Korda).
320	235	1,36	1,11	175	—	—	—	15,9	Allm. Svenska Elektr. bolaget.
530	400	1,32	1,10	178	—	—	—	16,2	General Electr. Co.
100	260	0,385	0,73	110	100	—	—	15,1	6polige Dynamo Oerlikon.
115	435	0,264	0,64	130	100	320	3,2	20,3	Allm. Svenska Elektr. bolaget.
110	500	0,220	0,60	135	—	—	—	22,5	Tramwaygenerator (Alioth).
100	500	0,200	0,58	100	90	300	3,34	17,3	4polige Dynamo Oerlikon.
74	475	0,156	0,54	125	—	—	—	23,2	Electr. Akt.-Ges., vorm. Lahmeyer.
90	600	0,150	0,53	120	—	—	—	22,6	„ „ „ „
74	600	0,123	0,50	110	—	—	—	22	General El. Co., Schenecdady.
45	800	0,056	0,38	70	65	220	3,4	18,4	4pol. Dynamo Oerlikon.
31	780	0,040	0,34	71	60	270	4,5	20,8	Hufeisen-Dynamo, G. Kapp.
7,5	1200	0,006	0,18	50	—	—	—	27,8	Elektr. Akt.-Ges., vorm. Lahmeyer.
4	1300	0,003	0,14	36	25	80	3,2	25,7	Oerlikon.

*) Durchmesser Wellenmitte $= C_1 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}}$.

Anmerkung. Die überaus grosse Verschiedenheit des Koefficienten C_1 erklärt sich teilweise aus dem Armatur- bezw. Magnetraddurchmesser. Bei der 600 pferd. Wechselstrom-Dynamo Farcot beträgt beispielsweise die Ausbohrung 5,6 m; der Wellendurchmesser musste deshalb entsprechend gross gemacht werden.

Man hat diesem Teile der Dynamokonstruktion nicht die Aufmerksamkeit geschenkt, welche er verdient.

Gewisse schlimme Erfahrungen, welche der Verfasser seinerzeit an Tramwaymotoren machte, bei welchen allerdings die Beanspruchung der Keile die denkbar ungünstigste ist, veranlassten ihn zu einer Untersuchung der verschiedenen im Gebrauch befindlichen Keiltabellen.

Es stellte sich hiebei heraus, dass die im allgemeinen Maschinenbau angewandten Keile für Dynamokonstruktion unzweckmässig sind. Der Hauptvorwurf richtet sich gegen die Höhe, welche für Broncenaben zu gross ist, während die ursprünglich für Gusseisen berechneten Keile wiederum zu schwach für Bronce sind. Da es nun von Wichtigkeit ist, ein möglichst einheitliches System zu besitzen, und ferner bereits von vielen schweizerischen und deutschen Maschinenfabriken das System von Julius Römele, Freiburg i. B. im Gebrauch ist, so dürfte es sich im Interesse grösster Einheitlichkeit empfehlen, dieses System auch für elektrische Maschinen zu adoptieren, jedoch mit der in Tab. XII vorgemerkten Modifikation.

Die Modifikation besteht darin, dass z. B. ein Keil von 18×32 m/m für Wellen von 111—120 m/m Durchmesser zu verwenden wäre, statt nach Römele für solche von 120—124, im übrigen sind überall die gleichen Höhen und Breiten beibehalten. Es hat dies den Vorteil, dass die fertigen Keile bezogen werden können.

2. Die Lager.

Die Lagerlänge hängt von der zulässigen Reibungsarbeit pro c/m² Druckfläche ab (spec. Reibungsarbeit).

Es sei

d der Wellendurchmesser in c/m,
l die Lagerlänge,
P der resultierende Lagerdruck aus Armaturgewicht und Riemenzug (siehe S. 46),
f der Reibungskoefficient,
A maximale zulässige Reibungsarbeit pro c/m².

Damit sich die Lager nicht erwärmen, muss sein

$$\frac{d \pi n}{60 . 100} . P . f <= \frac{d \pi l}{2} . A \text{ oder}$$

104. $$l => \frac{P . f . n}{3000 A}.$$

f variiert je nach Art der Schmierung und der Geschwindigkeit zwischen 0,06—0,1; A kann zu 1 Kgm. per $\%m^2$ angenommen werden.

Allgemein ist die Lagerlänge

für ganz kleine Maschinen: $l = 3{,}5$ bis $4\ d$,
„ mittelgrosse „ $l = 2{,}5$ „ $3\ d$,
„ grosse „ $l = 2$ „ $2{,}5\ d$.

Fast sämtliche modernen Maschinen, mit Ausnahme der lokomobilen Motoren, besitzen Ringschmierung und zwar je nach der Länge des Lagers mit einem oder zwei Schmierringen. Die Erfahrung zeigt, dass man mit einem einzelnen Schmierring zur Not Lager bis 400 m/m Länge schmieren kann (Dynamo von 200—250 *PS*), es ist jedoch ratsam, schon für kleinere Längen 2 Ringe anzuwenden.

Bei der Konstruktion von Lagern sollten folgende Gesichtspunkte beobachtet werden:

1. Auswechselbarkeit der Lagerschalen, letztere aus Bronce*) oder Guss mit Antifriktion-Ausfüllung;
2. Zugänglichkeit der Ölringe behufs Kontrolle ihres Funktionierens;
3. Möglichkeit einer raschen reichlichen Ölzufuhr, falls die Ringe ihren Dienst versagen;
4. Ringe aus nicht magnetischem Metall und nicht zu tief ins Öl eintauchend, weil ihre Reibung dadurch vergrössert und die Geschwindigkeit verringert wird;
5. Gehörige Tiefe des Ölbehälters, damit sich der im Öl befindliche metallische Staub niedersetzen kann.
6. Vermeidung einer Lagerteilung, bei welcher sich das Öl zwischen Lagerdeckel und Unterteil nach aussen ziehen kann.

*) Aus Bronce, wenn durch die Lager magnetische Kraftlinienstreuung zu befürchten ist.

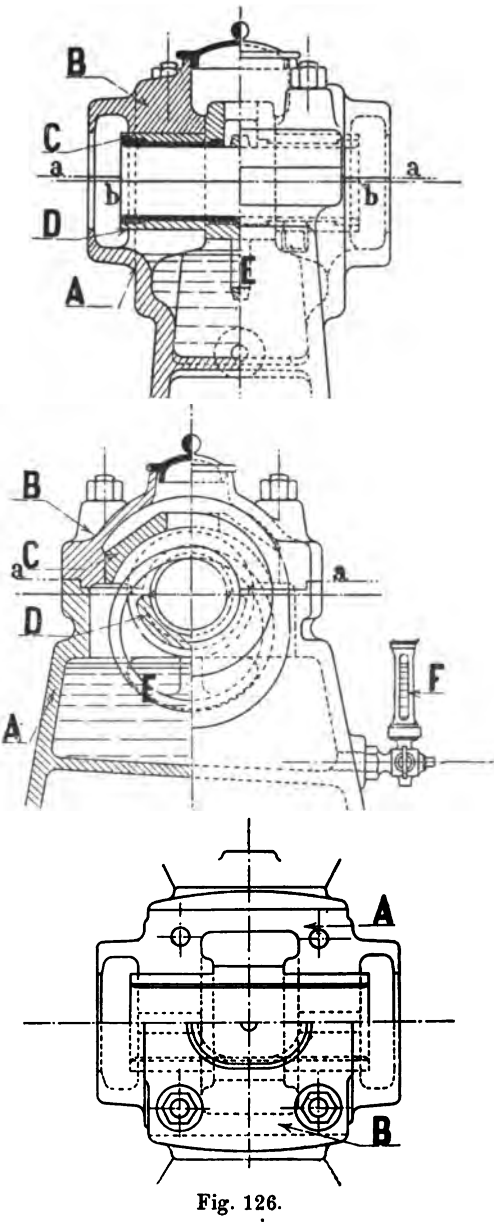


Fig. 126.

Diesen Punkten ist in jeder Beziehung Rücksicht getragen bei der in Fig. 126 dargestellten Lagerkonstruktion der Maschinen der Usine J. Farcot, Paris. Speciell der letztern Bedingung ist dadurch Rechnung getragen, dass sich der Schnitt der Lagerdeckel *a* 5 $^{m}/_{m}$ oberhalb desjenigen der Lagerschale befindet.

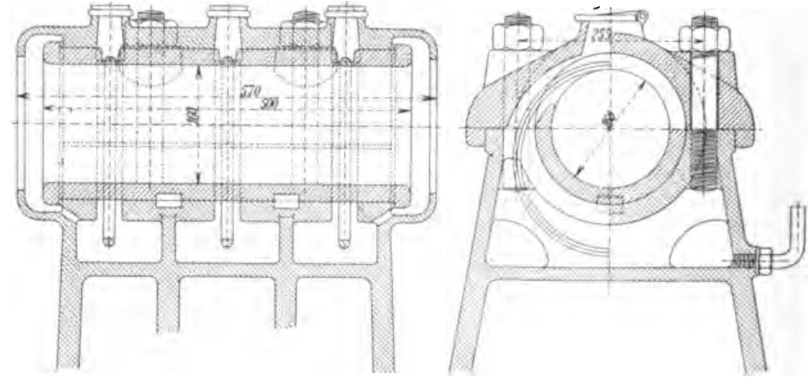


Fig. 127.

Als besonderer Vorteil mag auch angeführt werden, dass die obere Lagerschale aus einem Stück besteht und äusserst solid ist.

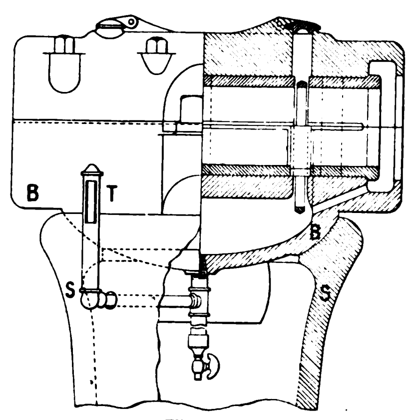


Fig. 128.

Im Principe gleich ist die Lagerkonstruktion der Wechselstrommaschinen von Alioth in Basel, die hier weggelassen ist. Fig.

128 und 129 stellen zwei grössere Lager mit 2 und 3 Schmierringen dar, wovon das erstere von der Cie. Fives-Lilles in Givors für eine 600 *PS* Maschine bei 300 Touren, das zweite von der General Electric Co. ausgeführt wird.

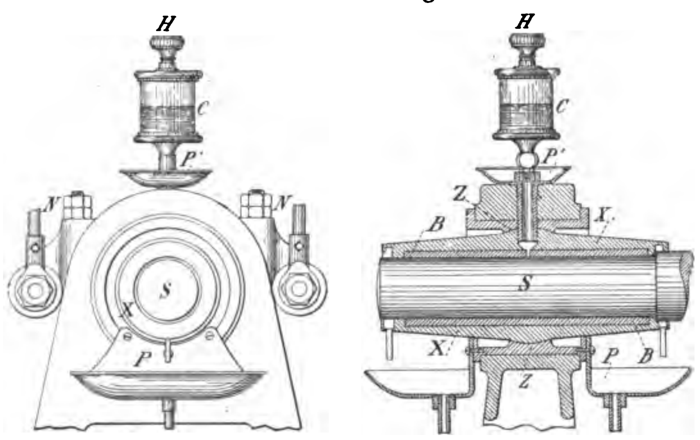


Fig. 129.

In Amerika herrscht häufig die Tendenz vor, die Lagerschalen nach dem Beispiele von Sellers universell einstellbar zu machen, wie z. B. Fig. 129 eines ältern Lagers der Westinghouse Co. zeigt. Um die etwas schwierige Herstellung der kugelförmigen Lagerausbohrung zu umgehen, giesst die bekannte Kleinmotorenfabrik der Crocker Wheeler Co. (siehe Fig. 130) die Lager einfach mit Komposition aus.

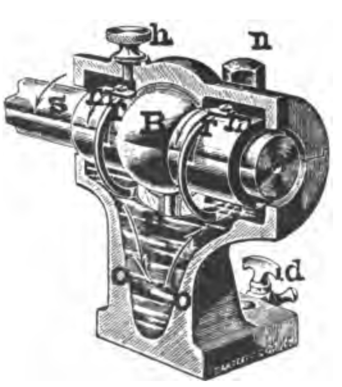


Fig. 130.

Weitere Lager-Konstruktionen finden sich in Kap. VIII.

Die Amerikaner wenden ferner häufig eine ausgezeichnete Methode an, um absolut genaue Lagerschalen zu erhalten, eine Einrichtung, welche übrigens seit 3 Jahren auch in Oerlikon zur Anwendung kommt und welche allgemeine Einführung verdient. Zu diesem

Zwecke werden die Lagerschalen nicht ausgebohrt, sondern es wird die Legierung um einen in der Mitte der Lagerschalen gehaltenen Kaliber gegossen, der sich in einer Führung *a* bewegt (Fig. 131). Am Ende des cylindrischen Teiles ist derselbe mit einer Schneide *f* und einem Konus *d* versehen.

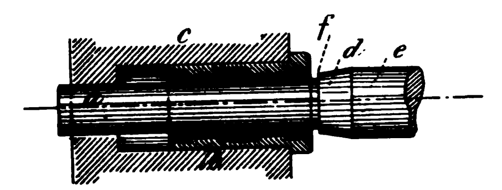


Fig. 131.

Der cylindrische Teil *e* hat genau den Durchmesser der Bohrung. Nachdem die Komposition eingegossen und etwas erkaltet ist, wird nun der Stempel durchgestossen, worauf die Lagerschale eine überaus harte und spiegelglatte Oberfläche erhält.

Diese Methode bietet hauptsächlich grosse Vorteile bei eventueller Nachlieferung von Reservelagerschalen.

Anmerkung. Nicht selten werden Dynamos vertikal ausgeführt und direkt mit der Turbine gekuppelt. In vielen Fällen ist der Turbinen-Konstrukteur bereit, das ganze Gewicht durch hydraulischen Gegendruck zu entlasten, die Konstruktion der Dynamolager vereinfacht sich dadurch wesentlich. Diese Anordnung verdient in manchen Beziehungen den Vorzug. Ausnahmsweise kommen jedoch auch Fälle vor, wo dem Dynamokonstrukteur die Aufgabe zufällt, das Gewicht der Armatur zu entlasten. Nicht immer ist dies mittelst eines Spurzapfens möglich, da oftmals das Gewicht und die Tourenzahl zu gross sind.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat sich daher auf ingenieuse Weise aus der Geschichte gezogen, indem sie bei verschiedenen Anlässen magnetische Entlastungsapparate anwandte (für die Berechnung siehe Gleichung 79).

Soll ein wirklicher Erfolg hiebei gesichert sein, so müssen folgende Sicherheitsvorschriften beobachtet werden:

1. Ist die magnetische Anziehungskraft vom Quadrate der Poldistanz abhängig. Es sollte daher durch einen geeigneten Spurzapfen das freie Spiel sowohl nach unten als nach oben genau abgegrenzt werden; nach oben insbesondere, wenn das Gebälke, auf welches die Dynamo montiert werden soll, etwas leicht ist und sich durchbiegen kann.
2. wird das Turbinengehäuse durch den Wasserdruck deformiert, so dass der dem Entlassungsapparate zufallende Druck in Wirklichkeit

viel grösser ausfällt, als das blosse Armaturgewicht nebst Welle und eventuellem Turbinenrad.

Es ist deshalb in allen Fällen in den Magnetstromkreis dieses Apparates noch ein Regulator einzuschalten, welcher die Stromstärken innert genügend weiten Grenzen zu ändern gestattet.

Für Spurzapfen gibt J. J. Reifer (Einfache Berechnung von Turbinen Verlag Meyer & Zeller) folgende Tabelle an:

Spurzapfen in $^m/_m$.

Belastung in $^k/_g$	Touren per Minute					
	bis 140	150	200	300	400	500
1000	40	42	46	53	59	63
2000	58	60	65	75	83	88
4000	83	85	92	103	118	125
6000	100	102	112	130	143	152
8000	114	118	130	150	165	176
10000	130	133	146	167	184	
12500	145	150	165	190		
15000	158	160	178			
17500	172	175				
20000	185					

Diese Durchmesser gelten für sogenannte Vollzapfen, d. h. für Stupfen, bei welchen sowohl im Spurzapfen als in der Spurplatte im Centrum nur ein kleines Loch von 5—10 $^m/_m$ gebohrt ist

3. Riemenscheiben und Seilscheiben.

Die Riemendicke ergibt sich aus der Formel

105. $$\mathfrak{g} = \frac{PS}{\gamma \,.\, \mathfrak{b}\, v} \; ^c/_m.$$

PS Pferdestärken,
$\mathfrak{b}$ Riemenbreite in $^c/_m$,
v Riemengeschwindigkeit in $^m/_{''}$,
γ Koefficient, der nach F. Reuleaux
für Lederriemen $= 0{,}16—0{,}30$,
„ Baumwollriemen $= 0{,}11—0{,}21$,
„ Kautschukriemen $= 0{,}15—0{,}25$
zu nehmen ist.

Einfache Lederriemen haben 4—6 $^{m}/_{m}$, Doppelriemen 6—15 $^{m}/_{m}$ Dicke, Baumwoll- und Kameelhaar-Riemen werden selbst bis zu 18 $^{m}/_{m}$ hergestellt.

Die Riemengeschwindigkeit ist bei

sehr kleinen Maschinen = ca. *8—10* $^{m}/$,
bei mittelgrossen " = *12—16* $^{m}/$
und bei grossen " bis *20* $^{m}/$,

wobei jedoch amerikanische Konstrukteure selbst bis auf 25 $^{m}/$ und mehr gehen.

Es wäre nun unrichtig, aus dem angenommenen Riemenscheibendurchmesser, bezw. der Riemengeschwindigkeit und der Riemendicke, die Scheibenbreite auszurechnen; man thut besser, sich bezüglich der Breite etwas an die bestehenden Ausführungen zu halten.

Hiefür mag mit Vorteil die Formel 106 benutzt werden. Setzt man nämlich

$$106. \qquad \mathfrak{b} = c \cdot \frac{PS}{v},$$

so gibt die am Schlusse stehende Tabelle XIII die Mittelwerte der Grösse c, aus den Riemenscheibentabellen von 8 der ersten Maschinenfabriken*) graphisch abgeleitet. Zu der letzten Chiffre dieser Tabelle ist zu bemerken, dass sie sich auf eine Dampfmaschine bezieht, welche auf einer grössern Riemenscheibe der Transmission arbeitete. Für Dynamos dagegen ist es nicht rätlich, unter $c = 5$ als Minimum zu gehen.

Für Maschinen bis ca. 400 PS lässt sich die Tabelle angenähert durch die Formel ausdrücken

$$107. \qquad c = 18 \sqrt{\frac{v}{PS}} \text{ oder}$$

$$108. \qquad \mathfrak{b} = 18 \sqrt{\frac{PS}{v}}.$$

*) Thompson-Houston, Westinghouse, Crocker Wheeler, Oerlikon, Ganz & Cie., A E G. Schuckert und J. Farcot.

109. $$\mathfrak{g} = \frac{1}{\gamma\, 18} \sqrt{\frac{PS}{v}}$$

als Minimum für Lederriemen.

Riemenübertragungen finden sich in Amerika in ausgedehnterem Masstabe als in Europa und zwar mit Riemenbreiten bis über 2 $^m/_m$ 000, warum ist nicht recht einzusehen, weil solche Riemen unverhältnismässig teuer zu stehen kommen, ganz abgesehen von der verminderten Betriebssicherheit. Ein solcher Unfall veranlasste auch seinerzeit eine der grössten Tramwaygesellschaften in Amerika, die Atlantic Ave. R. R. Co. in Brooklin, ihre breiten Riemen durch zwei nebeneinander liegende von halber Breite zu ersetzen.

Lamellen zum Spannen der Riemen bei kurzer Riemenscheibendistanz sind, wenn immer möglich, zu vermeiden, weil sie die Dauer des Riemens sehr benachteiligen. Es ist mir ein Fall bekannt (Licht-Centrale des Secteur des Champs Elysées in Paris), wo der Riemen alle 14 Tage repariert werden musste. Die Riemenscheibendistanz beträgt hier nur ca. 3 $^m/_m$ 500. Es wird nun der Versuch mit zwei übereinander liegenden einfachen Riemen gemacht, eine Methode, welche in England viele Freunde besitzt.

Für Maschinen, bei welchen $\frac{PS}{v} > 6$—10 ist, wird auch sehr häufig Seiltrieb angewandt.

Für runde Seile gilt folgende Formel

110. $$d^2 \cdot m = \gamma \cdot \frac{PS}{v}.$$

m Anzahl Hanfseile,
d Durchmesser in $^c/_m$,
γ Konstante, variiert zwischen 10—23.

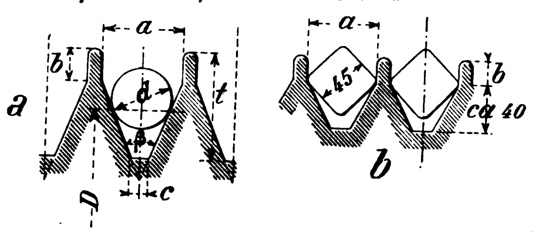


Fig. 132

Wie grosse Freiheit sich die Konstrukteure bei der Wahl dieser Konstanten γ erlauben, zeigt, dass Tremlett Carter im Electrician Seildimensionen angibt, für welche $\gamma = 9{,}3—12{,}8$ ist; die Dynamos von Alioth in Basel weisen die Konstante $\gamma = 11{,}5—13$ auf, für die Seile der Maschinenfabrik Oerlikon ist γ im Mittel gleich *14* und Ingenieur M. Seiffert gibt schliesslich den Wert von γ im Hülfsbuch für Electrotechnik von Grawinkel und Strecker zu 15—25 an.

Tabelle ausgeführter Seilscheiben der Maschinenfabrik Oerlikon (Fig. 132 *a*).

$\frac{PS}{v}$	PS	v	D cm	d cm	m	$\frac{D}{d}$	Beanspruchung pro cm^2 kg	γ	Dimensionen der Rillen			
									β	a	t	c
18,9	350	18,5	133	5	12	26,5	6	12,5	45°	5,5	6,15	2
16,1	380	23,6	150	5	14	30	4,4	17,0	46°	5,5	6,5	1,7
15,3	200	13,1	100	5	6	20	9,75	7,7	45°	5,5	5,7	1,8
12,7	300	23,6	150	5	10	30	4,9	15,4	46°	5,5	6,5	1,7
9,6	200	20,8	110	4	6	27,5	9,6	7,8	45°	5,3	6,5	1,4
9,2	200	21,7	69	4	8	17,2	6,8	10,9	45°	5,6	—	—
6,25	150	24	95	4,5	5	21	5,9	12,6	46°	5,5	5,4	2,5
6,2	140	22,6	108	4,5	6	24	4,8	15,3	48°	5,0	6,5	2,5
6,13	125	20,4	78	4	9	19,5	4,1	18,4	45°	4,8	5,8	1,6
5,66	140	24,7	118	4,5	6	26,2	4,4	16,8	48°	5,0	6,5	2,5
5,43	100	18,4	78	4	6	19,5	5,4	13,8	45°	5,1	6,5	1,8
4,9	100	20,4	130	5	4	26	4,7	16,0	45°	5,4	6,2	1,8
3,28	60	18,3	100	3,5	6	28,5	4,3	17,5	45°	3,9	4,6	—

Die grossen Verschiedenheiten in den Ausführungen ein und derselben Maschinenfabrik dürften vielleicht überraschen; es muss jedoch hinzugefügt werden, dass fast sämtliche dieser Riemenscheiben auf Bestellung und nach speciellen Angaben des Turbinenkonstrukteurs angefertigt wurden.

In neuerer Zeit haben sich auch viereckige Hanfseile nach Patent J. H. Beck, Schaffhausen (Fig. 132 *b*), eingebürgert, welche folgende Vorteile besitzen sollen:

1. Die Seile können sich nicht drehen, der Verschleiss ist daher geringer; überdies können dieselben später gewendet werden.
2. Die Konstruktion des Seiles erlaubt es, dasselbe in vollständig getrocknetem Zustande zu flechten, so dass sich dasselbe nachträglich nicht mehr streckt.

Der Katalog obiger Firma enthält folgende Angaben über die Kraft, welche mittelst eines Seiles von 45 $^m/_m$ übertragen werden kann.

Zahl der Seile.

PS	Seilgeschwindigkeit in $^m/$ per Sekunde			
	12	15	18	20
10	1	1	—	—
20	1	1	1	—
50	2	2	2	2
80	3	3	2	2
100	4	3	3	2
150	5	4	3	3
200	7	6	5	4
250	9	8	6	5
300	10	9	7	6
400	14	11	9	8
500	16	14	11	10

4. Der Armaturkörper.

Die Isolation der Eisenscheiben voneinander geschieht entweder durch Einlage von Papierscheiben von ca. 0,04—0,06 $^m/_m$ Dicke oder durch Anwendung von Blechen, welche an ihrer Oberfläche oxydiert sind. Die letztere Methode ist beispielsweise bei der Edison Co. in Schenectady, New-York, im Gebrauch. Ob sie billiger als Papierisolation zu stehen kommt, lässt sich hier nicht entscheiden.

Eine ganz vorzügliche Isoliermethode besteht auch darin, dass die Papierscheiben mittelst Schellack auf die Eisenscheiben geklebt werden, bevor man die Nuten stanzt. Auf diese Weise

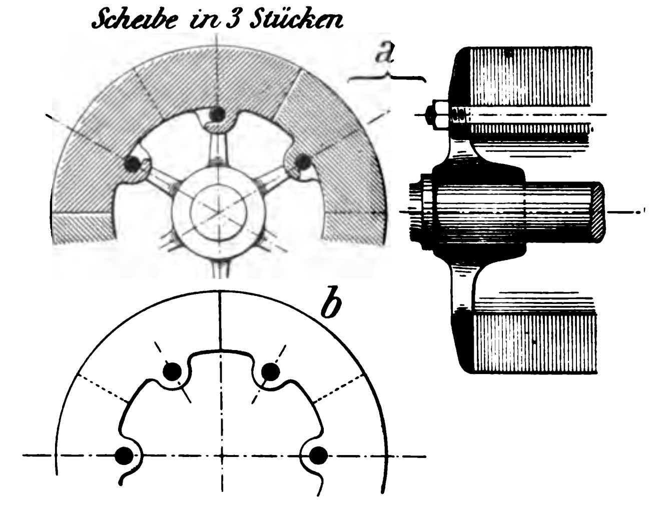


Fig. 133

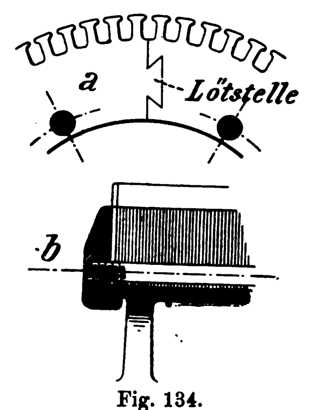


Fig. 134.

werden die Papiereinlagen zu gleicher Zeit gestanzt und, was die Hauptsache ist, die Armatur bildet sozusagen einen massiven Eisenklotz, der seine Form, nachdem er die hydraulische Presse verlässt, beinahe nicht mehr ändert, während im andern Falle den Blechen noch eine gewisse Federkraft innewohnt, die imstande ist, den Armaturstern zu zersprengen. Bei diesem Verfahren müssen die Blechscheiben unter der Presse erwärmt werden; nach ca. 2—3 Stunden sind die Bleche dauernd aneinander gekittet.

Da die Blechdicke gewöhnlich 0,5—0,6 m/m beträgt, wird der Gesamtquerschnitt folglich — kleine Unebenheiten der Bleche eingerechnet — zu ca. 85—90 % ausgenutzt.

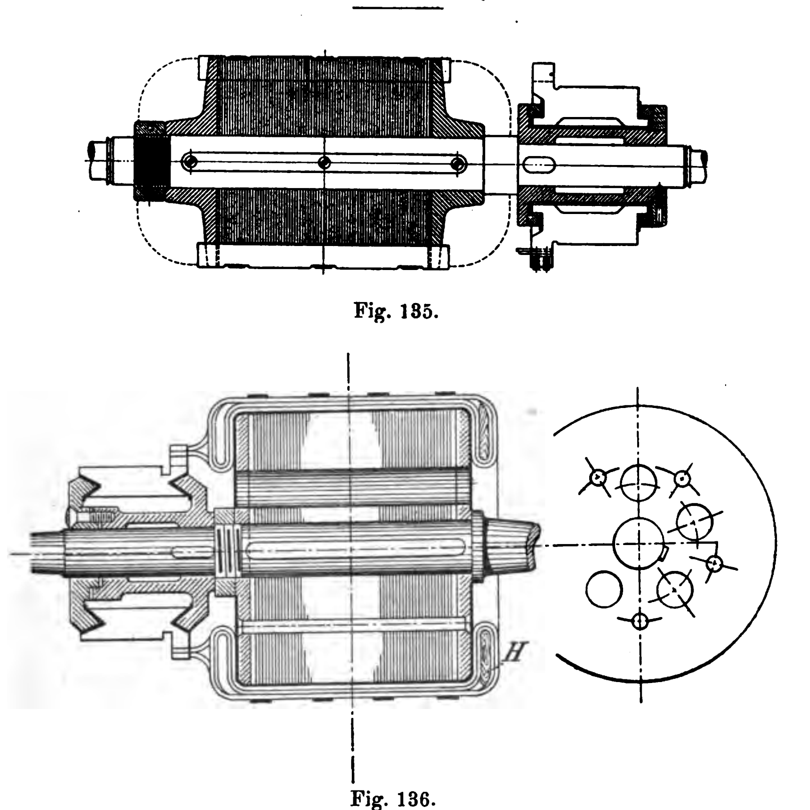


Fig. 135.

Fig. 136.

Z a c k e n a r m a t u r e n werden entweder vor dem Zusammensetzen gestanzt oder nachher gefräst; ein Stanzen, nachdem die Bleche gepresst sind, ist nicht rätlich, weil es leicht vorkommen kann, dass einzelne Zähne abgerissen werden. Unter allen Umständen müssen die Zacken nachträglich mit der Feile sorgfältig verputzt werden, um zu verhüten, dass sich einzelne Bleche berühren. Dem Verfasser sind mehrere Fälle bekannt, wo sich eine Erwärmung der Zacken nur auf eine Berührung der Bleche zurückführen liess und vermieden werden konnte, indem man dieselben nachher sauber bearbeitete. In einem speciellen Falle nahm die Erwärmung nach der Bearbeitung mit der Feile, die, nebenbei bemerkt, nicht sehr sorgfältig ausgeführt war, sogar zu. Es zeigt dies, dass

diese Arbeit mit äusserster Gewissenhaftigkeit vorgenommen werden muss, wenn sie zu dem gewünschten Resultate führen soll.

Für die Endscheiben zu beiden Seiten der Armatur werden gewöhnlich Bleche von 2—3 m/m verwendet.

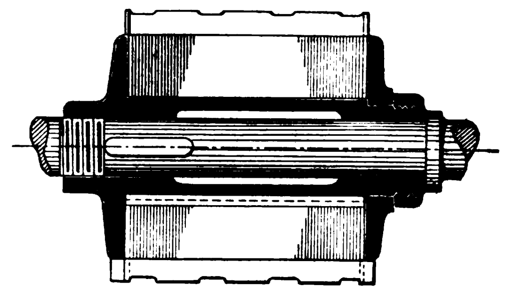


Fig. 137.

Eisendrahtarmaturen scheinen so ziemlich ausser Kurs gekommen zu sein, aus naheliegenden Gründen.

Bei **Maschinen mit seitlichen Polen** besteht die Armatur aus aufgewickeltem Eisenband, mit Papiereinlage, im übrigen ist dieser Type heute weniger mehr vertreten als früher, zum Teil vielleicht, weil das Eisenband bedeutend teurer als Eisenbleche ist.

Armaturbleche lassen sich im allgemeinen nur bis zu einem Durchmesser von 1—1,2 m/ aus einem Stücke herstellen, für grössere Armaturen müssen dieselben aus mehreren Stücken zusammengesetzt werden. Die Verbindung der einzelnen Segmente geschieht auf verschiedene Weise, wie die Figuren 133 und 134 zeigen, die keiner weiteren Erklärung bedürfen.

133 *a,* Methode von Wood, Cleveland,

133 *b,* „ „ G. Kapp,

134 „ „ Maschinenfabrik Oerlikon.

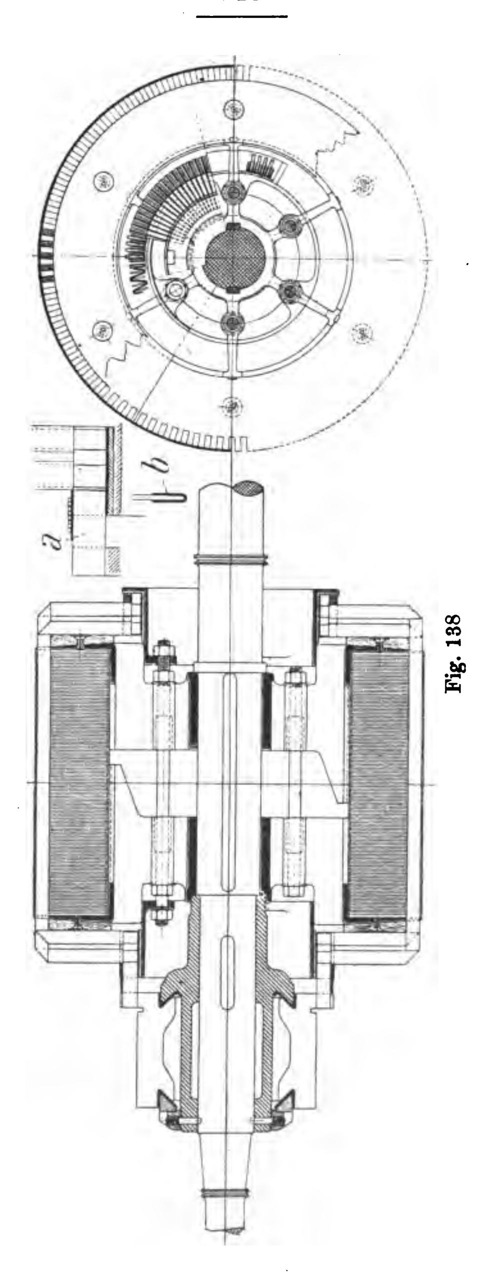


Fig. 138

Bezüglich der Anbringung der Eisenscheiben auf der Welle sollen hier nur die charakteristischen Konstruktionen angeführt werden, da der vorgesehene Raum zu knapp ist, um auch die

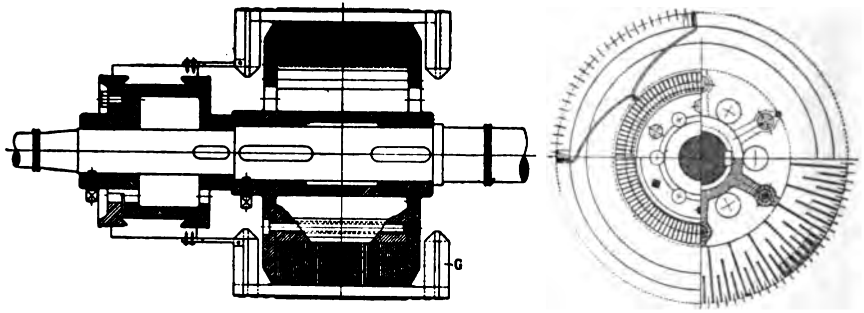


Fig. 139.

verschiedenen mehr oder weniger unwesentlichen Nüancierungen zu berücksichtigen.

Bei Fig. 135*) (Elektricitäts-Aktiengesellschaft vormals Lahmeyer & Co.), einer für kleine Armaturen sehr

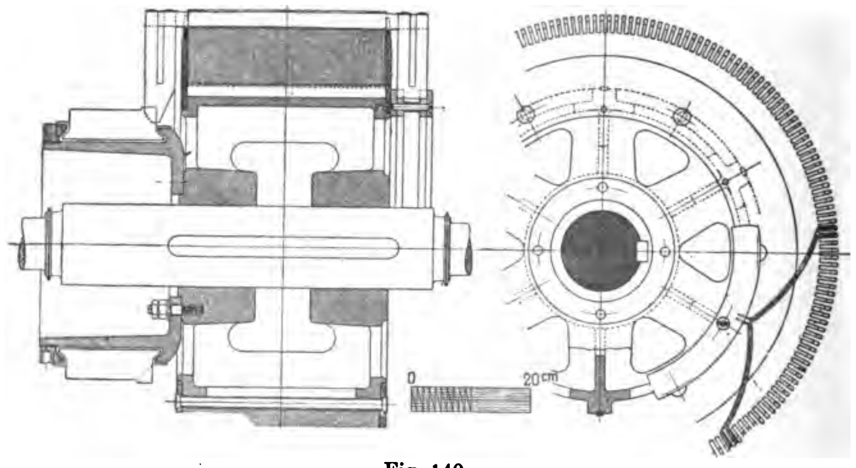


Fig. 140.

*) Die Figuren Nr. 135, 138—142 und 146 sind dem Buche „Armaturwicklungen und Armaturkonstruktionen" von E Arnold entnommen.

häufig angewandten Anordnung, sind die Bleche direkt auf die Welle gestossen und durch eine Mutter gehalten. Dies ist bei Motoren weniger zu empfehlen als bei Generatoren; da man solche Maschinen im Interesse einer billigen Herstellung häufig in grösserer Anzahl auf Lager anfertigt, so ist es sehr unbequem, wenn nachträglich specielle Wellen verlangt werden, wie dies bei Motoren kaum zu vermeiden ist. Dieser Nachteil ist bei den Armaturen (Fig. 136 und 137) umgangen, da hier die Welle selbst dann ausgewechselt werden kann, wenn die Wicklung bereits hergestellt ist. Speciell die Anordnung Fig. 136, welche im Prinzipe von der Westinghouse Co. in Pittsburgh herrührt und von der letztern selbst für ganz grosse Wechselstrommaschinen benutzt wird, hat mannigfaltige Vorzüge. Der Hauptvorzug besteht darin, dass ein besonderer Armaturstern wegfällt.

Zwar bedingt dies einen grossen Abfall an Blech, doch wird derselbe anderseits durch den Wegfall des Sternes und die geringeren Arbeitskosten reichlich aufgewogen. Für mittelgrosse Maschinen benutzt Oerlikon eine Konstruktion, die in Fig. 138 wiedergegeben

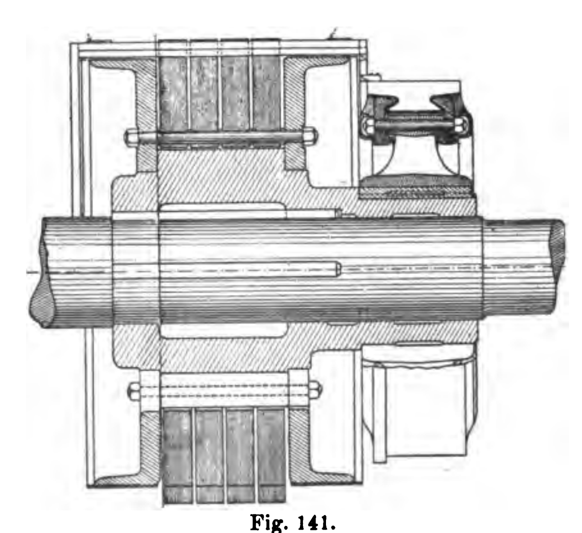


Fig. 141.

ist. Der Armaturstern hat sechs Arme, welche abwechslungsweise

ineinander greifen. Auf die Wicklung soll an einer späteren Stelle näher eingetreten werden.

Fig. 139 und 140 stellen ebenfalls zwei charakteristische Armatursterne dar, wovon die erstere von der General Electr. Co., die letztere von Alioth in Basel herrührt. Bei der Armatur von Alioth sind die Bleche wie bei Fig. 136 genietet; die Endscheiben sind zu diesem Zwecke aus dickem Eisenblech hergestellt. Die Armatur Fig. 139 besitzt ferner eine künstliche Ventilation, welche durch Einlage von zwei Messingscheiben mit Rippen erreicht wird. Es ist übrigens sehr zweifelhaft, ob dieselbe grossen Nutzen leistet.

Wir kommen nun zu zwei weitern Armaturen mit Mantelwicklung:

Fig. 141, Tramwaygenerator von H. F. Parshall, General Electr. Co.

Fig. 142, vielpolige Dynamo Brown, Boveri & Cie.

Die erstere dieser Maschinen besitzt ebenfalls künstliche Ventilation des Armaturkörpers. Besonders interessant ist sie noch durch die eigenartige und in jeder Beziehung vollkommene Oberflächenisolation des Collectors.

Da die Bleche mit Lappen versehen sind, welche in die Gussarme des Sternes eingreifen, so fallen weitere Keile zum Mitnehmen weg.

Bei der Armatur für mehrpolige Maschinen von Brown dienen die Bolzen zum Zusammenhalten der Bleche gleichzeitig auch als Mitnehmer, indem sie halb in den Gussstern, halb in die Blechscheiben eingelassen sind.

Die bisherigen Figuren beziehen sich in der Hauptsache auf Trommelarmaturen.*)

---

*) Weitere Ansichten von sehr hübsch ausgeführten Armaturen finden sich in dem bereits citierten Buche „Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen" von Prof. E. Arnold.

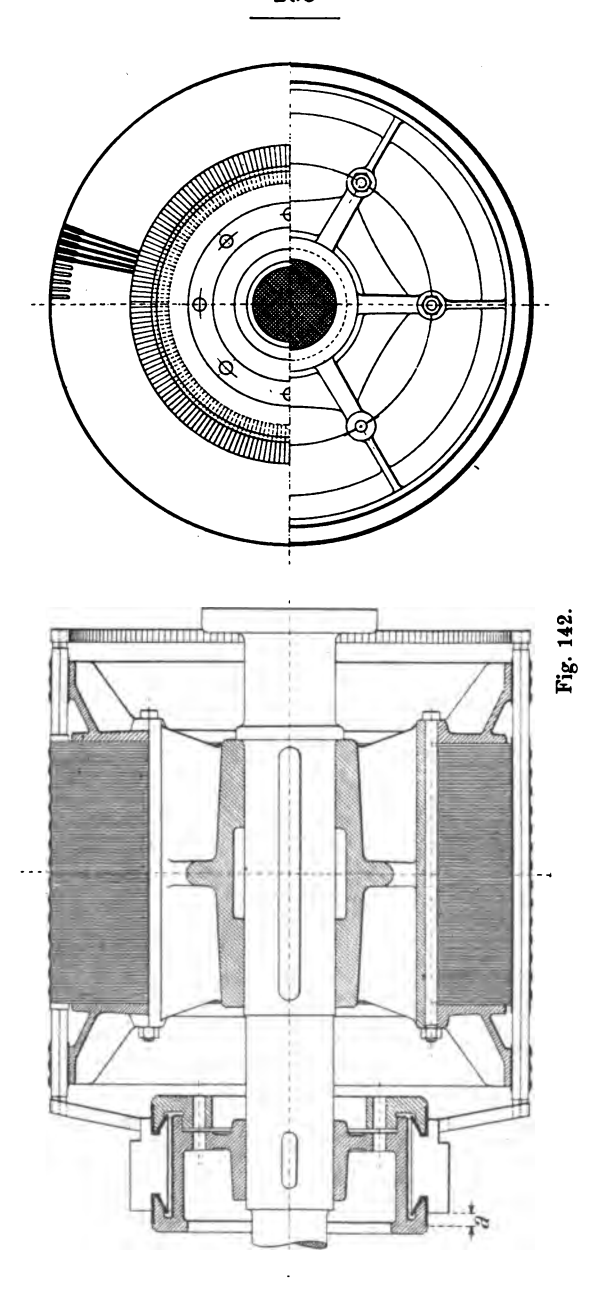


Fig. 142.

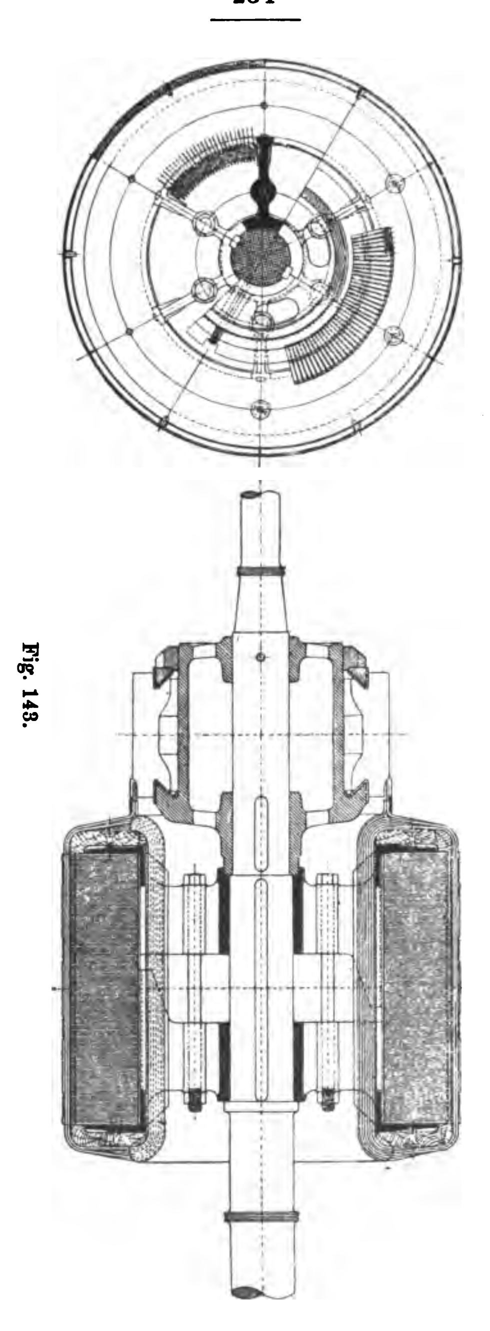


Fig. 143.

Zum Schlusse seien noch vier Sternkonstruktionen, welche sich hauptsächlich für Ringdynamos eignen (Fig. 143—146), angeführt. Mit Ausnahme derjenigen, Fig. 145 und 146, lassen sich die übrigen auch für Trommeln benutzen. Fig. 143 stellt die bekannte Brown'sche Disposition dar mit ineinander greifenden Armen;

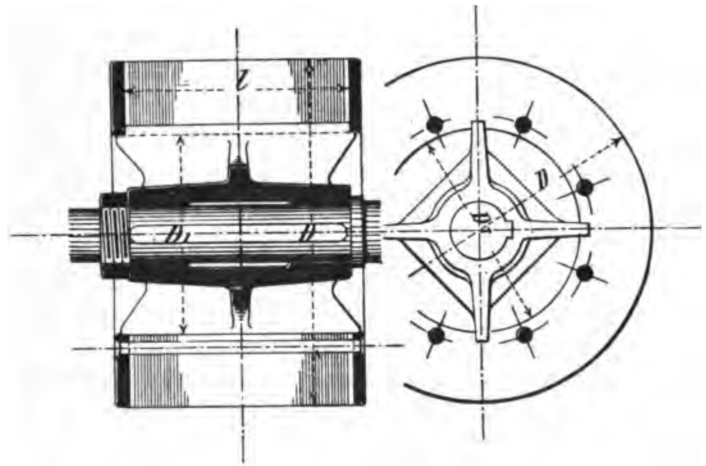


Fig. 144.

Details der Wicklung findet man in Fig. 151. Eine sehr einfache

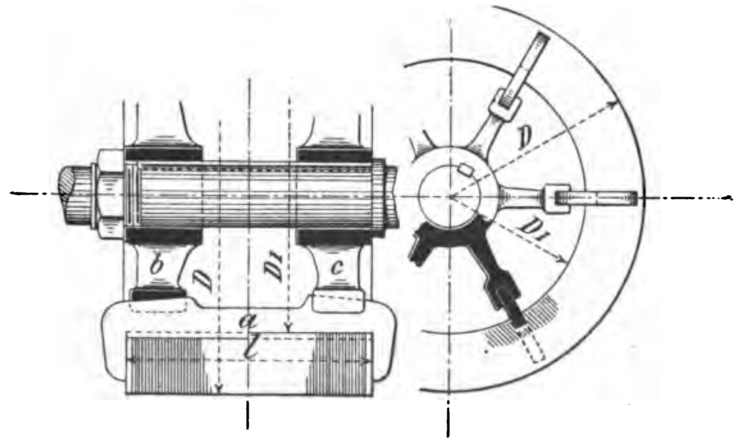


Fig. 145.

und billige Konstruktion ist auch diejenige des Verfassers Fig. 144, angewandt bei den Maschinen der Usine J. Farcot in Paris. Um das Zusammenpressen zu erleichtern, mögen die Bolzen einige % länger gelassen werden, als nötig; sie dienen in diesem Falle als Führung für die Bleche und werden nach dem Pressen auf die richtige Länge abgehauen.

Es braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden, dass diese Bolzen nicht isoliert zu werden brauchen, ebensowenig müssen dieselben aus Messing oder Bronce hergestellt sein. Es ist sogar erlaubt, diese Bolzen ziemlich weit in den Eisenkern hineinzusetzen, ohne Erwärmung befürchten zu müssen, indem die Selbstinduktion derselben so überaus gross ist, dass sozusagen kein Strom gebildet werden kann.

Sowohl bei dieser Konstruktion, als auch den zwei nachfolgenden, dienen die Arme gleichzeitig als Mitnehmer, da sie hiefür in das Blech eingelassen sind.

In neuerer Zeit wendet Brown für seine zweipolige Ringmaschinen eine ähnliche Konstruktion an, bei welcher die Arme ebenfalls in das Blech eingreifen.

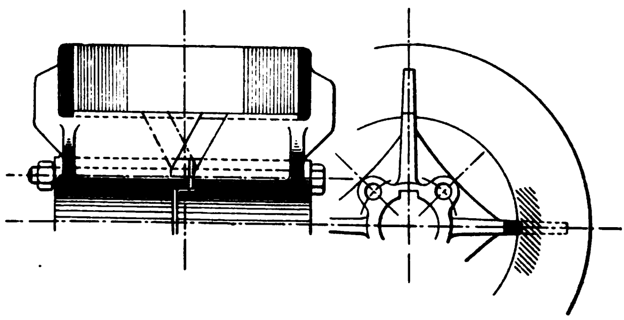


Fig. 146.

Wie bereits betont wurde, müssen die Sterne von Ringmaschinen aus Bronce hergestellt werden, bei Trommeln ist Guss der geringeren Kosten halber vorzuziehen.

Im allgemeinen werden grössere Maschinen gewöhnlich mit Trommelwicklung ausgeführt, oder, wo Ringwicklung vorgeschrieben

ist, macht man den Stern aus zwei Teilen, die Nabe nebst Armen aus Guss und den äussern Kranz aus Bronce. (Vergl. die Anordnung von Thury, Kap. VIII).

5. Commutator und Wicklung.

Commutator. Bei ganz kleinen Maschinen begegnet man noch öfters Ausführungen, bei welchen die Commutatorlamellen direkt auf die Welle montiert sind. Diese Konstruktion ist natürlich verwerflich, weil ein Auswechseln des Commutators, nachdem derselbe einmal abgenutzt ist, beinahe zur Unmöglichkeit wird. Sämtliche modernen Maschinen besitzen daher abnehmbare Commutatoren.

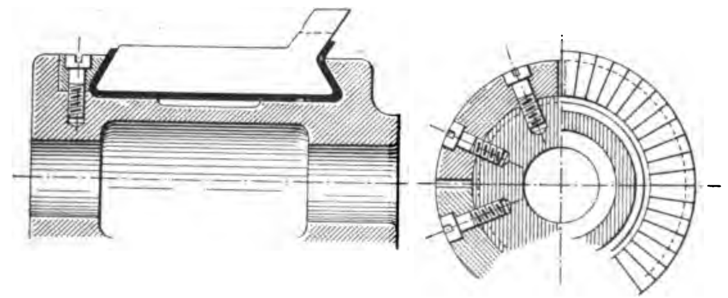


Fig. 147.

Die typischen Formen sind teilweise bereits in Verbindung mit der übrigen Armatur aufgeführt worden, siehe Fig. 135—143, weitere Anordnungen sind in Fig. 147 (Siemens und Halske) und 148 (Schuckert) ersichtlich. Dieselben unterscheiden sich von den erstern dadurch, dass der Pressring aus mehreren Stücken besteht, welche einzeln angeschraubt werden. Der Commutator Fig. 148 besitzt den Vorteil, dass die Lamellen, bevor sie auf die Büchse gebracht werden, gepresst und abgedreht werden können.

Bei sämtlichen Maschinen, bei welchen die Lamellen mittelst einer Mutter gepresst werden, darf die letztere nicht direkt auf die Lamellen, bezw. die Isolation drücken, sondern es ist eine Zwischenscheibe anzubringen, weil sonst die Isolation beim Anziehen verschoben und beschädigt würde. In solchen Fällen empfiehlt es sich

auch, die Mutter mit Feingewinde zu versehen, um ein Lockerwerden zu verhüten, nicht zu vergessen eine Sicherheitsschraube, welche zweckmässiger Weise so angebracht wird, dass sie auch gleichzeitig eine allfällige Verschiebung der Commutatorbüchse verhindert (Fig. 135 und 138).

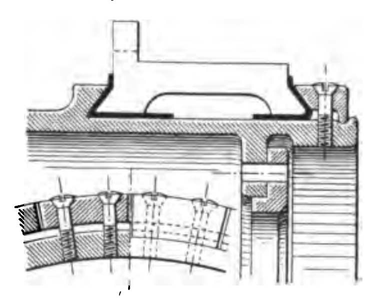


Fig. 148.

Als Isolation zwischen den einzelnen Lamellen wird entweder indische Micca (die billigere kanadische Micca eignet sich ihrer Härte wegen nicht hiefür), Presspahn, Fiber oder Asbest verwendet; die beiden letztern sind indessen nur für trockene Räume zulässig. Für die Isolation der konischen Flächen empfiehlt sich Papier und Miccanittuch, solche speciell geformten Stücke werden übrigens auch fertig in Miccanit (mit Kopal- oder Schellack zusammengeleimten Micca-Abfällen) und gepresstem Karton geliefert.

Besonderen Wert ist auf eine genügende Oberflächenisolation zwischen Lamellen und Büchse zu legen. Die Isolation soll daher — insbesondere bei höheren Spannungen — um ein gewisses Stück a (Fig. 142) $= 5—10$ m/m über die Lamellen herausstehen. Eine ausgezeichnete Oberflächenisolation ist bei dem bereits erwähnten Tramwaygenerator von Parshall erreicht (Fig. 141).

Um die Bürstenzahl zu vermindern, werden zuweilen die gegenüberliegenden Lamellen mit einander verbunden (Seite 18 und 19). Es ist jedoch davon abzuraten, diese Kreuzverbindungen (Engl. Cross-connections, franz. developpents) im innern des Commutators anzubringen; vorzuziehen ist die in Fig. 149 veranschaulichte Anordnung (Oerlikon).

Der Winkel α, den die Lamellen mit der Axe einnehmen, variiert zwischen 40—50°, am vorteilhaftesten und für das Auf-

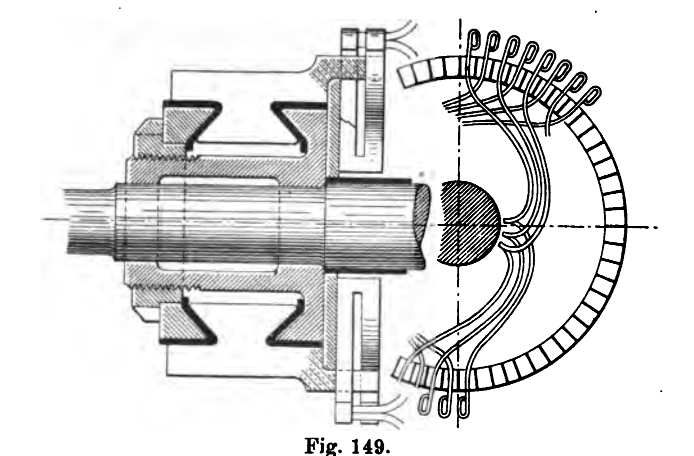


Fig. 149.

zeichnen auch am bequemsten ist ein Winkel von 45°. Die Büchse wird infolge dieser abgeschieften Form der Lamellen auf Zug be-

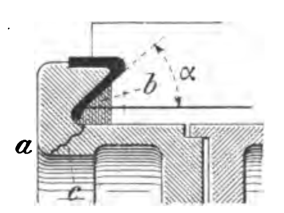


Fig. 150.

ansprucht und zwar kann der axiale Zug, in $^{k}/_{g}$ ausgedrückt, mittelst nachstehender Formel erhalten werden

111. $$Z = \frac{tg\,\alpha}{2} \cdot \frac{G}{9{,}81} \frac{v^2}{r} \cdot 100.$$

G = Gewicht der Lamellen.
v = Geschwindigkeit in $^{m}/_{s}$.
r = Radius des Schwerpunktes der Lamellen in $^{c}/_{m}$.

Brüche des Commutators finden gewöhnlich an der Stelle c (Fig. 150) statt und haben in 99 von 100 Fällen ihren Grund in Gussfehlern. Um daher sicher zu gehen, sollte der schraffierte konische Teil voll gegossen und nachträglich abgedreht werden; das gleiche gilt auch vom Armaturstern Fig. 151.

Als besondere Konstruktionsregeln, welche beim Entwurfe von Commutatoren im Auge behalten werden müssen, seien bemerkt:

a) Wenn immer möglich sollte die Zahl der Windungen pro Segment rings um den Commutator die gleiche sein.

b) Als Lamellenmaterial ist bei Kupferbürsten harte, homogene und stark kupferhaltige Bronce mit Presspahn- oder Miccaisolation, für Kohlen- oder Messingbürsten hart gezogenes Kupfer mit Miccaisolation zu verwenden. In Amerika werden die Segmente gewöhnlich im Gesenke geschmiedet (Eureka-lamellen).

c) Bei hochgespannten Seriemaschinen sollte die Spannung zwischen zwei Segmenten

$$e_2 = \frac{E\,2p}{N_2} < 30 \text{ Volt sein.}$$

d) Isolation zwischen 2 Lamellen

bei Spannungen bis	250 Volt	=	0,5—0,6 $^m/_m$.
„ „ „	500 „	=	0,7—0,8.
„ „ „	1000 „	=	0,8—1.
„ „ „	2000 „	=	1 —1,2.

e) Die Länge des Commutators hängt von der Bürstenauflagfläche ab, nicht zu verwechseln mit Bürstenquerschnitt. Im allgemeinen rechnet man für Metallbürsten 4 $^m/_m{}^2$ pro Ampère, geht aber bei kleinen Maschinen noch viel weiter.

Für gute Ausführungen ist ungefähr im Mittel

$$112.\quad \text{Auflagfläche in } {}^m/_m{}^2 \text{ pro Amp.} = 5 + \frac{200}{\text{Amp. pro Stift}}.$$

Für Kohlenbürsten sind 12—15 $^m/_m{}^2$ pro Amp. als Minimum erforderlich, ist man im Platz nicht sehr beengt, so nehme man 20—25 $^m/_m{}^2$.

f) Der Commutator muss so gezeichnet werden, dass die Lamellen möglichst vollständigst abgenutzt werden können, ohne dass ein Auseinanderfliegen zu befürchten ist.

Wicklung. Grammewicklungen werden zumeist nur auf glatte Armaturen angewandt. Fig. 151 zeigt einige Details der von Oerlikon benutzten Anordnung. Statt den Holzscheiben sind auch andere Isolationsmaterialien im Gebrauch, wie Tuch, Miccatuch, Papier, Isolit u. s. w., welche vielleicht den Vorteil geringeren Platzbedarfes bei gleicher Isolationsfähigkeit besitzen.

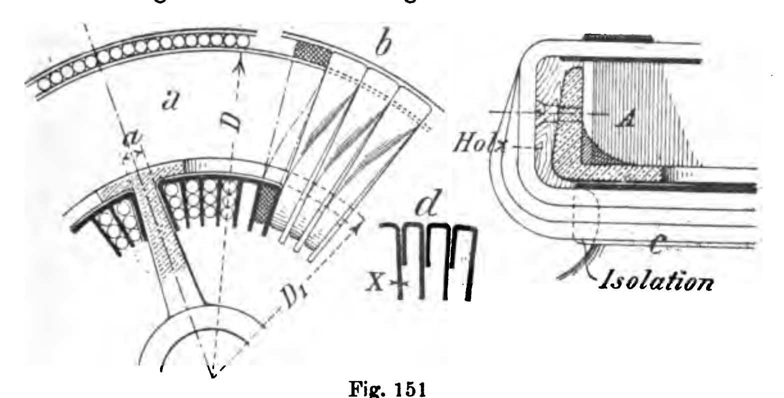


Fig. 151

Um eine nette Wicklung zu erreichen und die Enden nach aussen zu erhalten, sollte die Wicklung, wenn immer möglich, in der Mitte angefangen werden.

Weitaus mannigfaltiger sind die Trommelwicklungen, welche sich in 3 Gruppen einteilen lassen:

1. Knäuelwicklungen, Fig. 135,
2. Regelmässige Seitenwicklungen, Fig. 136, 138—140,
3. Mantelwicklungen, Fig. 141 und 142.

Die erstere Wicklungsart findet sich nur bei kleinen Maschinen mit Drähten vor und sie bedarf einer sehr guten Isolation der sich kreuzenden Drähte. Bei der regelmässigen Seitenwicklung, die sich sowohl für Drähte als Stäbe eignet, sind verschiedene Ausführungen vorhanden. Es können z. B. nach Art der General

Electr. Co. für die Wicklung gerade Stäbe benutzt werden, welche mittelst einer besonderen Zange umgebogen werden (Fig. 139), eine Konstruktion, welche, beiläufig bemerkt, auch schon längere Zeit bei der Maschinenfabrik Oerlikon im Gebrauch ist, mit dem Unterschiede, dass hier der Längsstab an beiden Enden so umgebogen wird, dass dieselben je einen Schenkel der Verbindungsgabeln bilden*) (Fig. 138). Die Verbindung zweier Gabeln unter sich geschieht mittelst einer Kupferblechrille, in welche die Enden eingelötet werden. Zu bemerken ist, dass zur Verbindung dieser Rillen mit dem Commutator noch ein besonderes Kupferblech benutzt wird, das bei allfälliger Reparatur einzeln losgelötet werden kann, eine Verbesserung, die nicht unterschätzt werden darf.

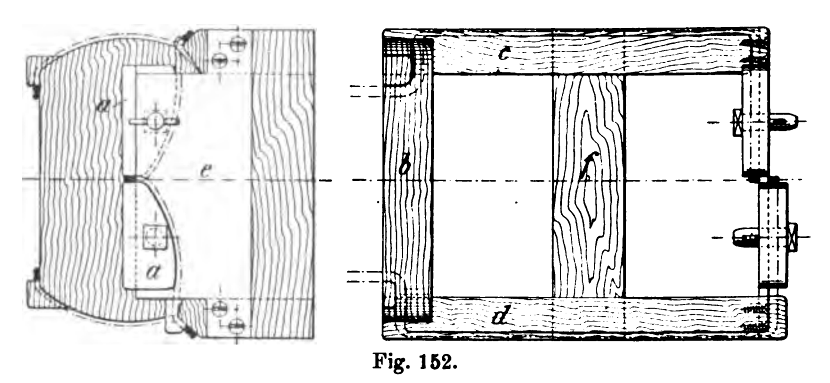


Fig. 152.

Fig. 140 zeigt eine Tramarmatur von Alioth in Basel, bei welcher die beiden Gabeln aus einem Stücke sind.

Sehr einfach in ihrer Herstellungsweise sind die sogenannten Mantelwicklungen, welche meines Wissens zuerst in Amerika ausgeführt wurden.

Wie aus Fig. 141 und 142 ersichtlich, fallen specielle Gabeln weg; der Hauptnachteil, welcher den Mantelwicklungen vorgeworfen werden kann, ist die grosse axiale Länge, besonders für Maschinen mit wenig Polen.

*) Siehe auch Konstruktion des Verfassers Fig. 194 und 195.

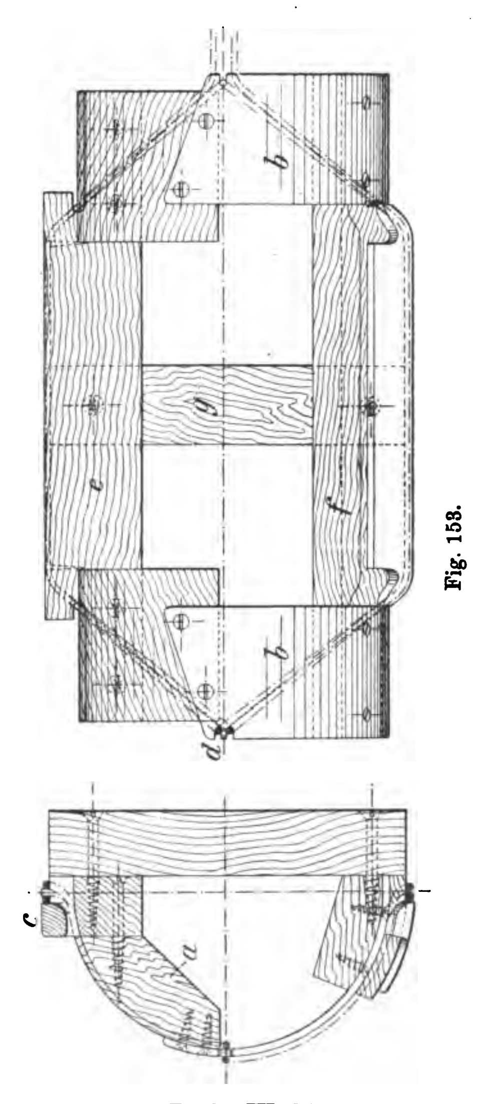


Fig. 153.

Sämtliche regelmässige Draht-Wicklungen lassen sich mittelst Schablonen — zuerst von Eickemeyer in Yonkers (N.-Y.) angegeben — ausführen. Die ursprüngliche Eickemeyer'sche Schab-

lone für 2polige Maschinen oder 4polige Maschinen mit Parallelschaltung ist schon so oft publiziert worden, dass sie wohl allgemein bekannt sein dürfte.

Fig. 152—155 stellen einige weitere Schablonen dar:

Fig. 152 ist eine Schablone für Seriewicklung; der Draht ist punktiert eingezeichnet. In vielen Fällen wird darauf verzichtet, die ganze Spule auf diese Weise herzustellen, sondern man biegt entweder die gegen den Commutator liegenden seitlichen Drähte von Hand ab, oder, was manchmal vorzuziehen ist, man stellt nur den geraden Teil des Drahtes, sowie je einen der nach verschiedenen Seiten abgebogenen Schenkel der Gabel über einer Form her; die zweite Lage wird dann ganz von Hand ausgeführt (siehe Fig. 136). Diese Arbeit kann durch Einlegen einer Holzscheibe *H* erleichtert werden.

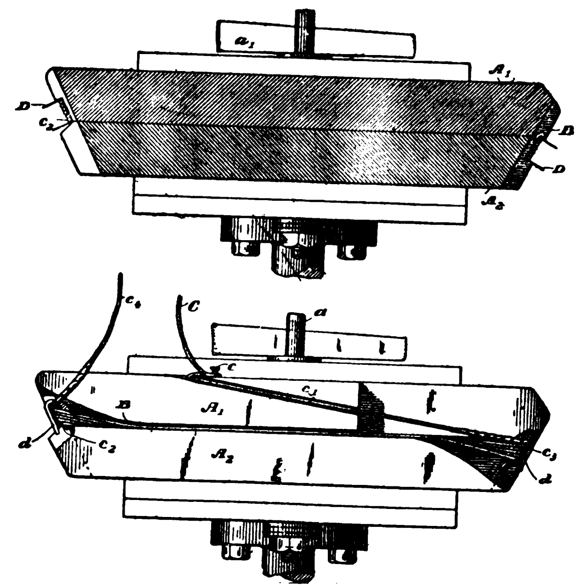


Fig. 154 u. 155.

Die Schablone Fig. 153 dient zur Verstellung von Mantelwicklungen und wurde bei der in Fig. 179—181 veranschaulichten

2poligen Maschine der Verfasser benutzt. Das Eigentümliche dieser Wicklung besteht darin, dass die Drähte einer Spule in zwei verschiedene Nuten verteilt sind, um die Selbstinduktion zu verringern.

Fig. 154—156 illustrieren die Fabrikationsweise der Westinghouse Trammotoren. Diese Wicklung ist ein Mittelding zwischen Knäuelwicklung und regelmässiger Wicklung; jede Spule wird noch mit Band isoliert.

Die grossen Vorzüge der Schablonenwicklung sind grosse Billigkeit und schnelle Herstellung, so wird behauptet, dass ein Westinghouse Trammotor von 30 *PS* (95 Nuten) in ca. 15 Stunden bewickelt werden kann, was durchaus nicht unwahrscheinlich ist; der Verfasser selbst hatte vor Jahren Gelegenheit, eine 80 *PS* Kraftübertragungsmaschine mittelst Schablonenwicklung zu bewickeln und bedurfte hiezu 40 Stunden (Spulen waren vorhanden), was einem routinierten Wickler offenbar in 30 Stunden gelungen wäre.

Bei Trommelwicklungen auf glatter Armatur sind sogenannte Driving horns (Mitnehmer), d. h. in die Armatur eingelassene dünne Messing- oder Fiberkeile unentbehrlich, weil die von den Bandagen herrührende Reibung allein keine genügende Sicherheit gegen ein Verschieben der Drähte gewährt.

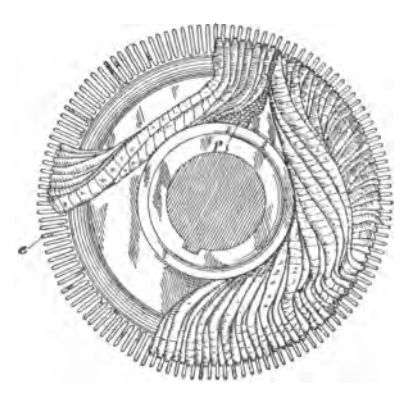


Fig. 156.

Die Isolation der Nuten-Armaturen besteht entweder aus Papier, Micca, Miccanit oder Tuch mit Miccaeinlage u. s. w. Es mögen hier einige Versuchsdaten über die Durchschlagsfähigkeit verschiedener Isolirmaterialien mit Wechselstrom Platz finden, nach Versuchen von Mr. Plumb (Sibley Journ., Juni 1895).

Dicke der Isolation in $^m/_m$				Spannung in Volt, bei welcher die Isolation durchschlagen wurde
Ölpapier	Micca	Luft	Ölschicht	
—	—	—	0,28	400 Volt
—	—	0,76	0,76	2140 „
—	—	2,67	1,27	5190 „
—	—	3,43	1,90	6280 „
—	—	3,94	2,54	6980 „
0,466	—	—	—	10400 „
—	—	7,26	3,80	11200 „
—	—	9,80	5,08	13300 „
—	0,216	—	—	16900 „
—	—	—	10,30	43000 „

Nach andern Versuchen der Maschinenfabrik Oerlikon ergab sich folgende Versuchsreihe:

Material	Dicke $^m/_m$	Volt	Anmerkung
Corde Bulle Nr. 1779 . .	0,0375	180—270	Blechscheibenisolat.
Weiss. Fiberpapier (hitzbeständig)	0,0915	720—810	
Isolierpapier 241 (weiss) .	0,11	1220	
Cellulosepapier (bräunlich) .	0,10	1350—1530	Magnetspul. und Armaturkörper.
Doppelt geöltes Papier . .	—	1800—2000	Kopf-Isolation für Knäuelwicklung.
Miccanitpapier (2 Plättchen Seidenpapier mit Miccaeinlage	0,1—0,16	2000—2400	Nutenisolation.

Die Verbindung der Wicklung mit dem Commutator geschieht entweder durch Verlöten oder Verschrauben, wovon die erstere Methode jedenfalls den Vorzug verdient. Es sei hierüber auf die bereits angeführten Figuren, sowie Zeichnung 157 verwiesen. Ist die Armatur mit Draht bewickelt, so ist es am einfachsten, die Drähte direkt in die Lamellen einzulöten; ist dies wegen der Dicke des Drahtes nicht möglich, so mag die Anord-

nung Fig. 157 *a* angewandt werden. Dieselbe ist auch stets bei gezogenen Kupferlamellen von Vorteil, weil sie den geringsten Materialabfall bedingt.

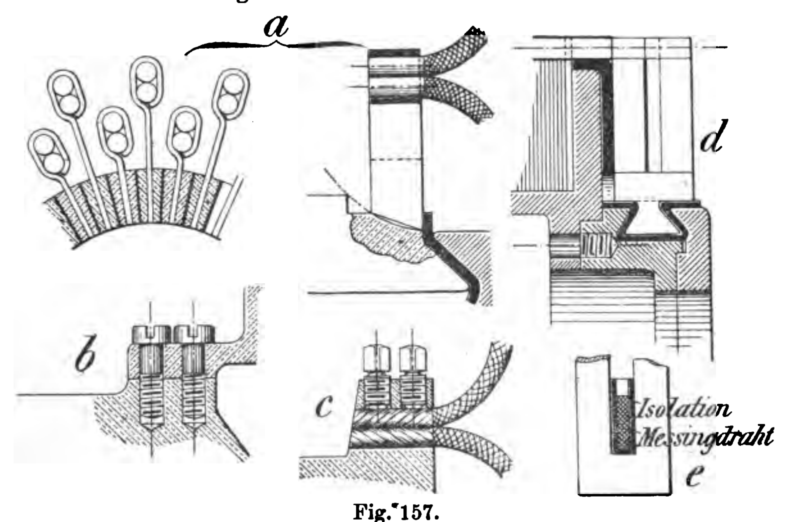


Fig. 157.

Fig. 149 stellt einen Collector mit Kreuzverbindungen nach dem Muster von Oerlikon dar. Es sei zum Schlusse noch auf die Armatur der Maschine Fig. 174 u. 175 verwiesen, welche mit einer Tuchverkleidung zum Schutze gegen Staub versehen ist. Bei Kohlenbürsten ist diese wohl kaum notwendig, ferner ist im allgemeinen davon abzuraten, dieselben auf der Riemenscheibenseite anzubringen, oder, wo dies aus bestimmten Gründen erfolgen muss, sollten in dem Tuche einige Öffnungen angebracht werden. Es liess sich nämlich in einigen Fällen konstatieren, dass Kurzschlüsse nur dadurch hervorgerufen wurden, indem sich die in der Armatur beim Erkalten gebildete Feuchtigkeit beim Ingangsetzen gegen den Umfang hinzog und die Isolation an dieser Stelle gefährdete.

6. Bandagen und Hülfscollectoren.

Die Bandagen dienen zum Halten der Wicklung gegen die Wirkung der Centrifugalkraft. Um dieselbe zu berechnen, denken

wir uns die Wicklung als einen Cylindermantel von der Länge $\mathfrak{L}$ (cm), der Dicke a (cm) und dem Radius $r = \frac{D}{2}$ hergestellt. Diesen Cylindermantel zerlegen wir in unendlich kleine Stücke von der Länge λ (cm) und berechnen und bestimmen für ein einzelnes Segment die Centrifugalkraft P

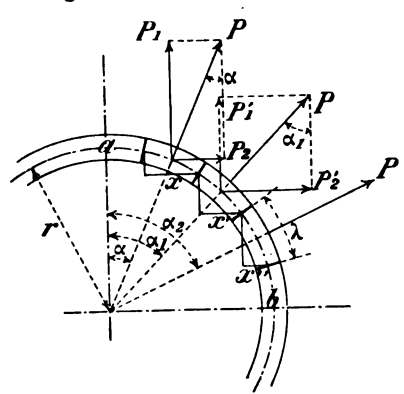


Fig. 158.

$$P = \frac{\text{Gewicht}}{9{,}81} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot 100 = \gamma \cdot \mathfrak{L} \cdot \lambda \cdot a \frac{v^2}{r} \cdot \frac{1}{10}.$$

$\gamma =$ specifisches Gewicht,

$$P_1 = P \cdot \cos\alpha = P \frac{x}{\lambda}.$$

Der auf den Bandagen-Querschnitt wirkende Zug ist hieraus

$$P_1 + P_1' + P_1'' + \ldots\ldots = \gamma\,\lambda \cdot \mathfrak{L} \cdot a \frac{v^2}{r} \left(\frac{x'}{\lambda} + \frac{x''}{\lambda} + \frac{x'''}{\lambda} + \ldots\ldots\right) \frac{1}{10} = \gamma \frac{\mathfrak{L} \cdot a\, v^2}{10}.$$

In dieser Gleichung kann

a durch $\frac{N \cdot s}{D\,\pi} \frac{1}{100}$, worin $s =$ Querschnitt eines Drahtes in mm,

v „ $\frac{D\,\pi\,n}{60} \frac{1}{100}$ und

γ „ $9{,}2$ (mit Berücksichtigung des Isolationsgewichtes) ersetzt werden.

Es bleibt dann
Zugkraft auf dem Querschnitt sämtlicher Bandagen (einfach gerechnet)

$$Z = N \,.\, s\, \mathfrak{L} \,.\, D\, n^2 \frac{8}{10^{10}}. \tag{113}$$

Am schwierigsten ist wohl die Grösse $\mathfrak{L}$ zu bestimmen, wofür natürlich nur derjenige Teil einzusetzen ist, welcher thatsächlich unter dem Einflusse der Centrifugalkraft steht und nicht durch irgend welches Hülfsmittel, geschlossene Nuten oder drgl. entlastet ist.

Tabelle über Bruchbelastungen von Drähten.

(Nach Lazare Weiller, Hütte u. s. w.)

Messingdraht	50 kg per mm².
Broncedraht	46 „
Doppelbroncedraht	80 „
Duranadraht	80 „
Deltametall	100 „
Siliciumbronce oder Type *c* (Laz. Weiller)	75—80 „
Hartkupfer	45 „
Bessemerstahldraht (blank)	65 „
Tiegelflussstahldraht	120 „

Die oben abgeleiteten Formeln dürften hinreichen, um zu zeigen, wie ungefähr eine Bandage zu berechnen wäre. In der Praxis nun kümmert man sich in der Regel wenig um solche Formeln, wie es überhaupt eine Regel des Elektrotechnikers ist, den elektrischen Teil der Maschinen bis auf 4 Decimalstellen zu berechnen, und das „bischen Mechanik“ aus dem Handgelenk zu entwerfen, ob in diesem Falle mit Recht, werden wir gleich an einigen Beispielen sehen.

Beispiel I. Wir wählen hiefür eine Maschine von 300 *HP* mit mässiger Umfangsgeschwindigkeit (Nutenarmatur).

$$n = 300,$$
$$\mathfrak{L} = 60 \text{ cm},$$
$$N = 490,$$
$$s = 30 \text{ mm}^2 \text{ und}$$
$$D = 115 \text{ cm}.$$

Hiebei sei vorausgesetzt, dass die Drähte auf den Stirnflächen gehalten seien, was thatsächlich nicht immer der Fall ist, $\mathfrak{L}$ ist somit ungefähr gleich der Armaturlänge.

Nach Gleichung 118 ist somit

$$Z = N \, . \, s \, \mathfrak{L} \, . \, D n^2 \frac{8}{10^{10}} = \frac{490 \, . \, 30 \, . \, 60 \, . \, 115 \, . \, 90000 \, . \, 8}{10^{10}} = 7300 \; kg.$$

Für die Länge von 60 cm würden für gewöhnlich 5 Bandagen à 30 mm Breite vorgesehen von Duranadraht à 1,5 mm Durchmesser (Querschnitt 1,75).

$$\text{Querschnitt sämtlicher Drähte} = 5 \, . \, \frac{30}{1,5} \, . \, 1,75 = 175 \; mm^2.$$

$$\text{Bruchfestigkeit} = 175 \times 80 = 14000 \; kg.$$

W i r b e s i t z e n a l s o n u r e i n e 1,9 f a c h e S i c h e r h e i t, w ä h r e n d m a n b e i s o n s t i g e n K o n s t r u k t i o n s t e i l e n e i n e 5 f a c h e S i c h e r h e i t z u m m i n d e s t e n f o r d e r t und dabei ist noch gar nicht berücksichtigt, dass das Gewicht der Drähte auf den Stirnflächen eigentlich hinzuzurechnen ist.

Es drängt sich nun unwillkürlich die Frage auf: Soll die Zahl der Bandagen vermehrt und der Drahtdurchmesser vergrössert werden? Eigentlich sollte man das meinen, praktisch wird man sich jedoch in 99 Fällen von 100 mit der angegebenen Disposition begnügen, warum? weil, trotzdem Bandagenbrüche verhältnismässig selten sind und da wir uns vor dem Machtspruche der Erfahrung zu beugen haben, als Regel aufgestellt werden mag, dass eine 2fache Sicherheit noch genügend sei.

Beispiel 2. Für eine Maschine von ca. 15 Kilowatt ist:

$$N = 340,$$
$$s = 9,$$
$$\mathfrak{L} = 25,$$
$$D = 30,$$
$$n = 1000.$$

Die Maschine ist mit Knäuelwicklung ausgeführt.

$$\text{Folglich } Z = \frac{340 \, . \, 9 \, . \, 25 \, . \, 30 \, . \, 1000000 \, . \, 8}{10^{10}} = 1840 \; kg.$$

Gewiss der grösste Teil der Dynamokonstrukteure würde hiefür 4 Bandagen (im Maximum) à 20 mm Breite mit 1 mm Draht vorsehen.

Dies entspricht einer Bruchfestigkeit von

$$4 \, . \, \frac{20}{1} \, . \, 0,78 \, . \, 80 = 5000 \; kg, \text{ d. h. einer 2,7fachen Sicherheit.}$$

Die beiden Beispiele, welche mit gleichem Resultate beliebig vermehrt werden könnten, mögen genügen, um zu zeigen, dass

man wenigstens in der Wahl des Drahtmateriales äusserst sorgfältig verfahren muss und dass eine kleine Kontrollrechnung manchmal nichts schaden kann. Je grösser die Maschine, um so eher ist diese Vorsicht geboten; in vielen Fällen wird man dann dazu gelangen, für die Stirnwicklungen einen besonderen Hülfscollector (siehe Fig. 157 *d*) anzuwenden. Ein sehr gutes Resultat kann auch mit der Anordnung Fig. 157 *e* erreicht werden, welche verhältnismässig leichter und billiger herzustellen ist.

Zum Schlusse mögen noch einige Regeln über die Herstellung der Bandagen von Nutzen sein, obwohl man diese Arbeit für gewöhnlich dem Gutfinden des Wicklers überlässt.

Fig. 159 zeigt ein sehr elegantes Bandagenschloss der Maschinenfabrik Oerlikon. Als Unterlage dient ein Tuchband, worüber ein Miccastreifen gelegt ist. Das Kupferblech ist ca. 0,1—0,15 $^{m}/_{m}$ dick und an beiden Enden mit Ösen versehen. In die eine davon wird der Anfang des Drahtes eingeführt und gehörig durch eine Schnur verankert, während man in die andere vorläufig ein Stück des nämlichen Drahtes steckt. Bevor nun die letzte Windung beendigt wird, verlötet man die Bandage an 5 oder 6 Stellen und zieht schliesslich noch das Drahtende durch die freie Öse, worauf die Enden in der angegebenen Weise umgebogen und das Schloss gehörig verlötet wird.

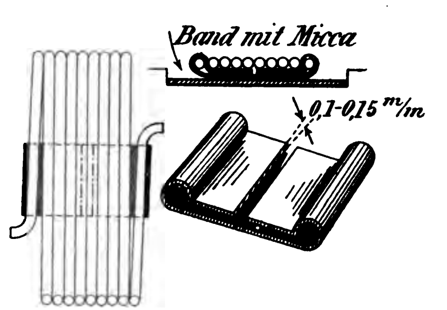


Fig. 159.

Es ist nicht ratsam, die Lötung rings herum vorzunehmen, weil sich die Bandage sonst leicht infolge von Foucaultströmen erwärmen und eventuell loslöten kann.

7. Bürstenhalter und Bürsten.

Kleinere Motoren oder solche, die für Traktionszwecke bestimmt sind, haben gewöhnlich fixe Bürsten, bei grösseren Motoren dagegen, sowie bei Generatoren, müssen dieselben verstellbar gemacht werden.

Unter allen Umständen jedoch müssen die Bürsten, um eine konische und rillenartige Abnutzung zu vermeiden, axial verstellbar angebracht werden, wobei es sich empfiehlt, nach dem Muster von Brown die von den Bürsten bestrichene Commutatorlänge gegen die Armatur hin durch eine Rille abzugrenzen.

Die Konstruktion des Bürstenhalters zeigt im allgemeinen eine grosse Übereinstimmung.

Gewöhnlich werden die Bürstenhalter drehbar auf dem Lager befestigt, wobei der Hebel gleichzeitig mit einer Schraube zum Feststellen versehen ist. Nur bei sehr grossen Maschinen ist nach amerikanischem Muster ein besonderer am Magnetgestelle angeschraubter Support mit Armen vorzuziehen, in welchem der Bürstenapparat drehbar angeordnet ist.

Mechanische Verschiebung mittelst Schnecken und Schneckenrädern hat den Vorteil einer exakten Bürsteneinstellung, ist jedoch bei einer guten Maschine unter 50—60 Pferden nicht notwendig und verteuert nur die Maschine.

Die gewöhnliche Art der Isolation der Bürstenstifte ist in der Fig. 160 *a* veranschaulicht und ist ohne weiteres verständlich.

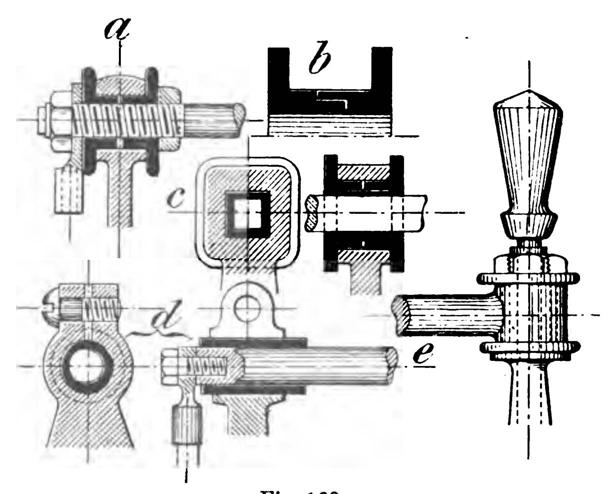


Fig. 160.

Bei Spannungen über 100—150 Volt ist besonderes Gewicht auf eine gute Oberflächenisolation zu legen, die Scheiben müssen folglich 8—15 m/m über den Gusshalter hervorragen.

Ein schwacher Punkt befindet sich ferner an der Trennungsstelle der Isolationshülsen, indem selbst dann, wenn sich die beiden Büchsen berühren, die Möglichkeit eines Durchschlagens nicht ausgeschlossen ist.

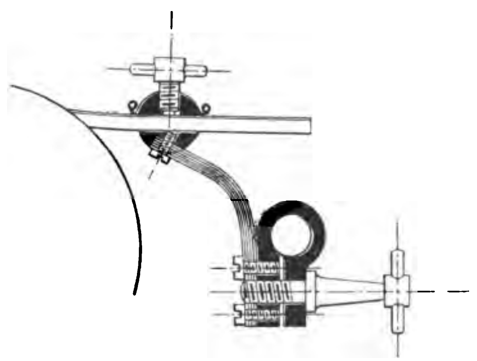


Fig. 161.

Diesem Übelstand ist bei den Konstruktionen *b* und *c* vorgebeugt. Eine sehr einfache Anordnung ist auch diejenige von Fig. 160 *d*. Sie besitzt den Vorteil, dass der Bürstenstift nach rückwärts herausgezogen werden kann und ist infolge dessen sehr bequem, wenn die Distanz zwischen Bürstenstift und Collector resp. Wicklung zu klein ist, um den Bürstenapparat auf jener Seite herausnehmen zu können. Aus dem nämlichen Grunde ist es nicht rätlich, die rechte Mutter in Fig. 160 *a* mit dem Bürstenstifte aus einem Stücke herzustellen. Fig. *e* zeigt schliesslich eine von C. L. Brown häufig benutzte Konstruktion.

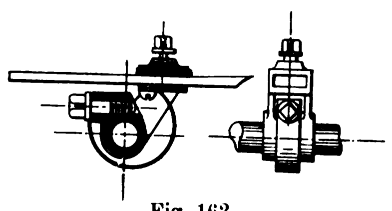


Fig 162.

Einige Konstrukteure wenden Bürstenhalter an, bei welchen die Bürsten gleichzeitig mittelst isolierten Hebeln oder Zahnrad abgehoben werden können. Obwohl dadurch die Einrichtung des Bürstenhalters ziemlich kompliziert und verteuert wird, so hat dies seine grossen Vorteile, wenn beispielsweise die Dynamos durch Dampfmaschinen angetrieben werden, bei welchen im Momente des Anlassens ein Rückwärtsdrehen möglich ist.

Bei Kohlenbürsten ist man dieser Vorsicht enthoben.

Die Konstruktion des eigentlichen Bürstenapparates ist so mannigfaltig, dass es zu weit führen würde,

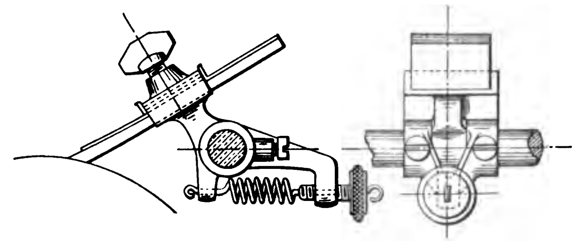


Fig. 163.

die heutzutage vorkommenden, zum Teil exotischen Konstruktionen auch nur einigermassen vollständig zu behandeln. Wir beschränken uns daher auf die wenigen gleichsam als Urtypen dienenden guten Ausführungen.

Fig. 161 ist unstreitig die verbreitetste und einfachste Form, ein gutes Funktionieren ist jedoch an folgende nicht zu umgehende Bedingungen geknüpft:

1. Die Feder muss aus gutleitendem und federndem Material, hart gewalztem Kupfer oder Messingblechen von 0,2—0,5 m/m hergestellt sein.
2. Der von dieser Feder gebildete Winkel darf nicht zu klein sein, weil sonst beim Andrücken eine Verschiebung der Bürsten nach vorwärts oder auch ein Umkippen der letztern um eine Kante eintritt.

Fig. 162 und 163, zwei Konstruktionen von Brown, wovon hauptsächlich die erste sehr gut durchgeführt ist, finden sich eben-

falls in unzähligen Varianten vor. Man könnte derselben vielleicht den Vorwurf machen, dass die Plattfeder etwas nahe an den Collector zu liegen kommt. Sehr originell ist auch der Bürstenhalter von Alioth, Fig. 187.

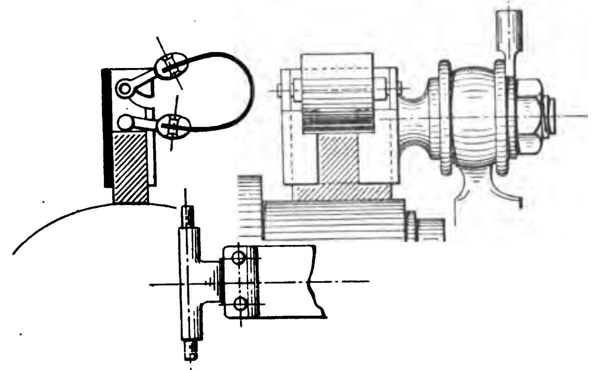


Fig. 164.

In neuerer Zeit kommt man nach und nach mehr von den Metallbürsten etwas ab und beschränkt deren Anwendung mehr noch auf Maschinen mit grossen Stromstärken. Die praktische Verwendung der Kohlenbürsten datiert kaum 8—9 Jahre. Ur-

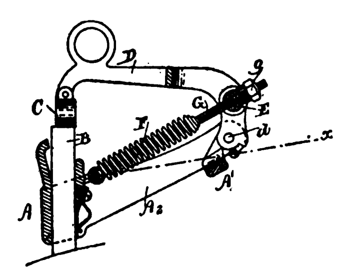


Fig. 165 a.

sprünglich von Prof. G. Forbes vorgeschlagen, fanden Kohlenbürsten zuerst eine praktische Verwendung in Amerika, wo dieselben bei Tramwaymotoren, bei denen eine vor- und rückwärtsgehende Bewegung erforderlich ist, benutzt wurden. Wenn sie später wieder etwas in Misskredit kamen, so ist dies einzig nur dem Umstande zuzuschreiben, dass die Bedingungen zu wenig bekannt

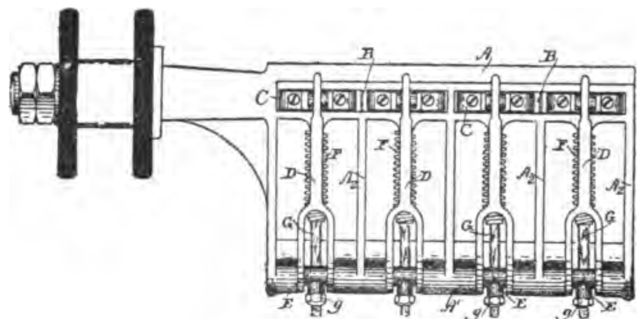


Fig. 165 b.

waren, welche zur Erreichung eines guten Ganges eingehalten werden müssen.

1. Müssen die Lamellen aus möglichst hartem und homogenem Kupfer hergestellt sein,

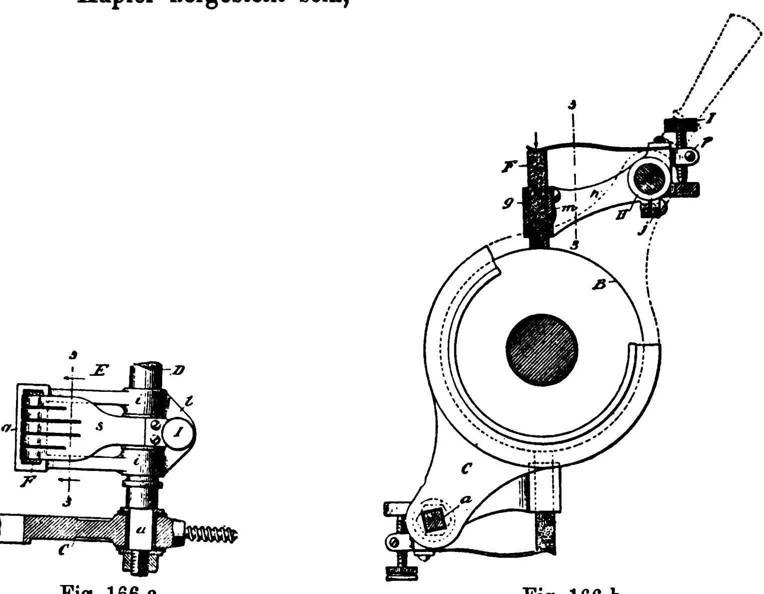


Fig. 166 a. Fig. 166 b.

2. soll das Isolationsmaterial zwischen den Lamellen (zumeist Micca) nicht sehr hart sein und sich gleichmässig mit den Lamellen abnutzen,

3. sind nur Kohlen aus möglichst gut leitendem, nicht zu trockenem, aber auch nicht sehr fettem Material geeignet.
4. muss der Bürstenhalter möglichst leicht sein, um bei den nicht zu vermeidenden Unebenheiten des Commutators nicht zu vibrieren. Besonders geeignet hiefür sind auch schief aufliegende Kohlenstücke (165 *a*).

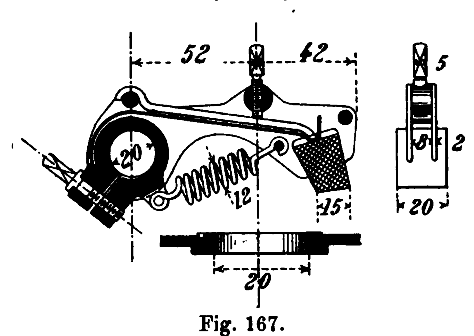


Fig. 167.

Die Figuren 164—166 repräsentieren drei amerikanische Formen:

Fig. 164, Lundell,

Fig. 165, Westinghouse (für Tramgeneratoren),

Fig. 166, Wood.

Ein ganz neues und vorzügliches Prinzip vertritt der Bürstenhalter von Thury (Cie. de l'Industrie Electr., Genève) Fig. 167. Statt nämlich die Bürstendimensionen je nach der Stromstärke zu ändern, adoptierte Thury einen stehenden Type von bestimmten

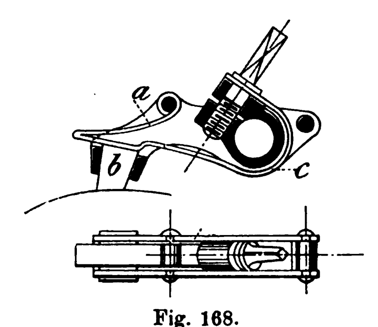


Fig. 168.

Dimensionen, von welchem je nach der Stromstärke mehr oder weniger auf einen Stift montiert werden. Auf diese Weise wird nicht nur die Fabrikation bedeutend erleichtert (die Selbstkosten pro Bürstenhalter kommen auf kaum Fr. 1. 20—1. 50 zu stehen), sondern es wird ein gutes Aufliegen der Bürsten gesichert. Nicht ganz vorwurfsfrei ist die Stromableitung, welche teils durch die seitlichen Scheiben aus galvanisiertem· gestanztem Eisenblech, teils durch ein dünnes eingeklemmtes Kupferblech geschieht.

Bei dem Bürstenhalter der Maschinenfabrik Oerlikon (nach dem Vorbilde Thury's entworfen) ist der Kontakt der Kohlenstücke mit den Scheiben etwas inniger, überdies bestehen die letztern aus Kupfer. Die Plattfeder *a c* hat zwei Bestimmungen,

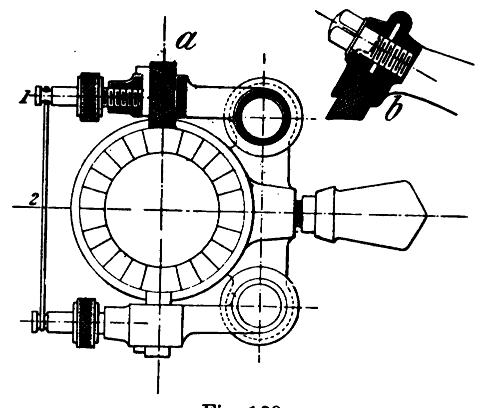


Fig. 169.

das Stück *a b* dient zum Anpressen der Kohle an den Halter, während das Stück *b c* die Federung des Ganzen zu bewirken hat.

Auch hier ist sicherheitshalber unter die Plattfeder noch ein Kupferblech geklemmt.

Hieran schliesst sich noch eine sehr einfache Ausführung eines Kohlenbürstenhalters für sehr kleine Maschinen Fig. 169 *a*, bei welcher die Metallfeder durch ein Kautschukband (*2*) ersetzt ist.

Bemerkenswert ist auch die Klemmvorrichtung von Alioth für die Kohlenstücke (Fig. 169 *b*).

Bezüglich des Bürstenmateriales sei auf Seite 240 verwiesen. Der Bürstendruck mag zu ca. 70—100 gr pro $\%_m^2$ Auflagfläche angenommen werden, bei Tramwaymotoren dagegen ist dieser Druck bis auf 250 und 300 gr zu erhöhen.

Es gilt als Regel, nie weniger als 2 Bürsten pro Stift zu verwenden, um die eine davon abheben zu können, ohne dass dadurch der Strom unterbrochen wird.

B. Die Magnete.

1. Magnetgestell.

Wenn es früher sozusagen zum guten Tone des Elektrotechnikers gehörte, neue Mechanismen für Bogenlampen zu entwerfen, so wird gegenwärtig, und zwar speciell in Amerika, das Erfinden von neuen Magnetanordnungen als eigentlicher „Sport" betrieben. Fast keine Woche vergeht, ohne dass wieder ein neuer Type auf dem Markte erscheint. In vielen Fällen mögen ja die neuen Formen vollständig durch den beabsichtigten Zweck der Maschine begründet sein, es ist jedoch nicht abzuleugnen, dass die Mehrzahl derselben seine Existenz lediglich dem Geschmacke verdankt. Wir verzichten deshalb auch auf eine Beschreibung der verschiedenen Magnetanordnungen. Tafel II enthält schematische Skizzen von 42 der am meisten vorkommenden charakteristischen Maschinen und ist auch ohne besondere Erklärung verständlich.

Neuere Maschinen werden sehr häufig aus Stahlguss hergestellt. Bei mobilen Motoren oder Maschinen, bei welchen die Gewichtsfrage von Bedeutung ist, mag dies vollständig begründet sein, für gewöhnliche Beleuchtungsmaschinen jedoch sollten folgende Gesichtspunkte erwogen werden:

Wie die Tafel I zeigt, genügt die gleiche Zahl *aw*, welche für 7400 Kraftlinien pro $\%_m^2$ in Gusseisen erforderlich ist, um 15000, d. h. rund zweimal mehr im Stahlguss zu erzeugen; mit andern Worten: Zur Erreichung einer bestimmten Zahl Kraftlinien (Φ) muss bei Anwendung von Gusseisen den Magneten

doppelter Querschnitt gegeben werden. Da nun Stahlguss ca. 50—60 Cts. per kg und Gusseisen bloss 25—30 Cts. kostet, so stellen sich die beiden hinsichtlich Preis ungefähr gleich; das geringere Gewicht des Stahlgusses würde sogar zu dessen Gunsten sprechen. Anderseits jedoch ist nicht jede Maschinenfabrik auch im Besitze einer Stahlgiesserei, dagegen dürfte es wenige Fabriken geben, welche nicht auch gleichzeitig eine Graugussgiesserei zur Verfügung haben. Die Lieferung wird dadurch, falls Stahlguss verwendet wird, bedeutend verzögert (Stahlguss verlangt mindestens 3—4 Wochen) und zu den blossen Gusskosten treten noch diejenigen für Transport und Retouchierarbeiten, welche bekanntlich nicht unerheblich sind. Zu bedenken ist auch, dass der Magnetkranz bei Stahlguss nicht wohl aus einem Stücke mit den Lagern gegossen werden kann. Wiegt man die Vor- und Nachteile gegen einander ab, so wird man in den meisten Fällen zu dem Resultat gelangen, dass es bei grösseren Maschinen am empfehlenswertesten ist, den äussern Kranz aus gewöhnlichem Gusseisen, die Polstücke, welche die Spulen tragen, dagegen aus Stahlguss mit Polschuhen auszuführen, weil das Kupfergewicht dadurch bedeutend reduziert werden kann.

2. Magnetspulen.

Der Wicklungsraum. Man achte darauf, den Wicklungsraum nicht zu knapp anzunehmen.

Mit Bezug auf die auf Seite 74 angegebenen Formeln ist der effektive Wicklungsraum durch das Produkt aus $s \times m$ bestimmt. Nun ist

$$s = \frac{(\mathfrak{J}\, m)\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50} \text{ und}$$

$$m = \frac{(\mathfrak{J}\, m)}{J}.$$

Multiplizieren wir beide Gleichungen miteinader, so folgt mit Berücksichtigung des für die Isolation erforderlichen Raumes

$$114. \quad \text{Wicklungsraum } F = c\, s\, m = c \,.\, \frac{(\mathfrak{J}\, m)^2\, \mathfrak{L}}{50\, w} \text{ in } \mathrm{mm}^2.$$

w = Wattverlust pro Spule,
($\mathfrak{J}\, m$) = $a w$ pro Spule,
$\mathfrak{L}$ = mittlere Windungslänge in $^m/$,
c = Koefficient (siehe untenstehende Tabelle).

Es sind nun zwei Windungsarten zu unterscheiden.

Bei der ersten werden die Drähte direkt übereinander gewickelt, bei der zweiten Wicklungsart kommt je eine Windung der nachfolgenden Lage zwischen zwei Windungen der darunter befindlichen zu liegen (Fig. 170). Da die letztere hauptsächlich für konische Wicklungen benutzt wird, wollen wir sie mit rechteckige, die andere mit konische Wicklung bezeichnen.

Der Koefficient c nimmt mit dem Drahtdurchmesser ab und kann folgendermassen genommen werden:

Tabelle der Werte von c.

Drahtdurchmesser d =	0,5	1	2	3	4	5 u. mehr
Reckteckige Wicklung c =	0,1	0,057	0,04	0,035	0,033	0,032
Konische Wicklung c =	0,075	0,043	0,03	0,026	0,025	0,024

Konstruktion der Spule.

Das Gehäuse der Spule wird meistenteils aus gepresstem Karton, Isolit oder Asbest hergestellt (Weidmann, Rapperswyl, Gebr. Adt, Ensheim u. s. w.); Ebonit eignet sich hiefür nicht, weil es bei Erwärmung weich wird.

Bei vielen Maschinen trifft man auch Spulengehäuse aus Eisen oder Zinkblech, die mit Papier oder Tuch isoliert sind, wobei für die Endschilder Holz benutzt ist. Für konische Wicklung eignet sich sehr gut eine Spule aus Eisen- oder Zinkblech mit Papierisolation, wobei die Ränder ringsum aufgebörtelt werden, um der Wicklung einen Halt zu gewähren. Zur Befestigung der fertigen Spulen auf dem Eisenkerne dienen Bolzen oder auch ganze Equairen, letztere besonders, wenn die Spule nur aus Isolationsmaterial besteht. Bei Verwendung von eisernen Gehäusen kann die Befestigung auch

dadurch geschehen, dass man das Blech mit angenieteten Lappen versieht, welche mit dem Kern verschraubt werden. Bei konischen Wicklungen müssen die äussersten Drähte einer Lage durch eingelegte Bänder gehalten werden.

Ableitungen. Es ist unter keinen Umständen zulässig, den Draht direkt nach den Klemmen zu führen, für die Ableitungen sind stets Kabel- oder Kupferstreifen zu verwenden. Besonders

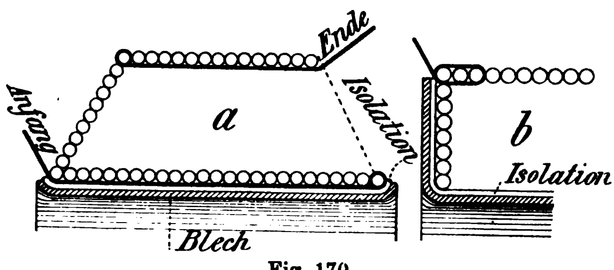


Fig. 170.

die letzteren sind sehr bequem für die Verbindungen einzelner Spulen untereinander, indem man die beiden Kupferbänder mit einander verschraubt. Um zu verhüten, dass die Ableitung abgerissen werden kann, sollte man das Kupferband mit mehreren Windungen gleichzeitig verlöten (Fig. 170 *b*). Eine andere sehr gute Konstruktion besteht darin, die ganze letzte Lage über der isolierten Ableitung zu wickeln. Als Isolationsmaterial können Miccastreifen dienen, welche sehr wenig auftragen, so dass man der Spule von aussen beinahe nichts ansieht.

Gebr. Adt in Ensheim und andere stellen Magnetspulen aus gepresstem Karton (Isolit) her, bei welchen der Drahtanfang in eine am Schild vorgesehene Nute verlegt wird.

Die richtige Herstellung der Ableitungen ist, so unbedeutend dieselben vielleicht erscheinen mögen, von entschiedener Bedeutung, weil durch eine unsaubere Ausführung das ganze Aussehen der Maschine gestört und der Eindruck einer oberflächlichen Arbeit hervorgerufen wird.

C. Klemmen und Kabelschuhe.

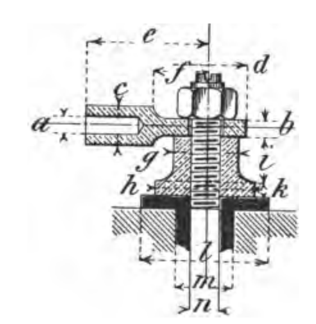


Fig. 171.

Tabelle über Dimensionen von Kabelschuhen und Klemmen.

Ampère	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	
													m/m *)	engl. Zoll
5	2	2	6	15	22	11	13	19	9	3	25	12	6	$^1/_4$
10	3	2	7	15	24	12	13	19	9	3	25	12	6	$^1/_4$
15	4	3	8	15	26	13	13	19	9	3	25	12	6	$^1/_4$
25	5	3	10	19	30	14	16	24	10	4	32	15	8	$^5/_{16}$
35	6	4	11	19	34	15	16	24	10	4	32	15	8	$^5/_{16}$
50	7	5	13	19	38	16	16	24	10	4	32	15	8	$^5/_{16}$
70	8	5	14	24	42	18	20	30	15	5	40	18	10	$^3/_8$
100	10	6	16	24	45	20	20	30	15	5	40	18	10	$^3/_8$
150	12	7	17	30	50	20	25	36	17	6	48	21	12	$^1/_2$
220	14	8	20	30	55	24	25	36	17	6	48	21	12	$^1/_2$
300	17	9	26	38	65	28	32	48	20	7	60	26	16	$^5/_8$
400	20	10	30	38	70	30	32	48	20	7	60	26	16	$^5/_8$
550	25	12	37	45	80	32	40	60	22	8	75	31	20	$^3/_4$
750	30	15	45	55	95	40	50	75	26	10	90	37	25	1
1000	35	17	50	66	100	45	60	85	30	10	100	44	30	$1^1/_4$

*) Officielles französisches Gewindesystem.

Weitere Kabelschuhe und Klemmen sind in den Figuren 172 *a*—*g* dargestellt.

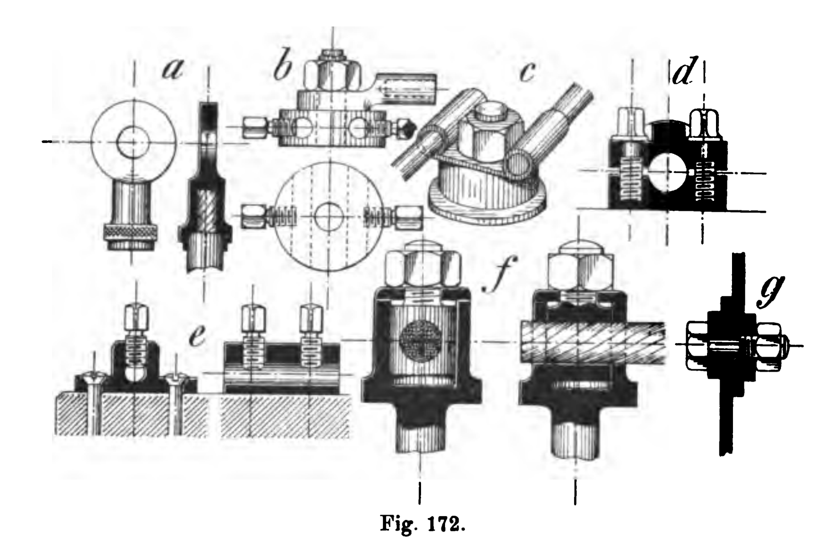


Fig. 172.

Einen sehr saubern Abschluss gibt hauptsächlich der Kabelschuh *a*, bei welchem die Isolation ein Stück weit in die Öse hineingelassen ist.

D. Riemenspannschienen.

Wo die Dynamos nicht direkt gekuppelt werden, sollten dieselben stets auf Spannschienen montiert werden. Die geringen Kosten derselben kommen, verglichen mit den bedeutenden Vorteilen, kaum in Betracht. Bei mittelgrossen Maschinen genügen in der Regel zwei Spannschienen, grössere Maschinen erfordern dagegen noch eine dritte Schiene in der Mitte ohne Spannvorrichtung.

Fig. 173 zeigt einige der üblichen Spannvorrichtungen (Fig. *b* Dynamo J. Farcot, Fig. *d* Dynamo Brown, Boveri & Cie.), die ohne weitere Erklärungen verständlich sind.

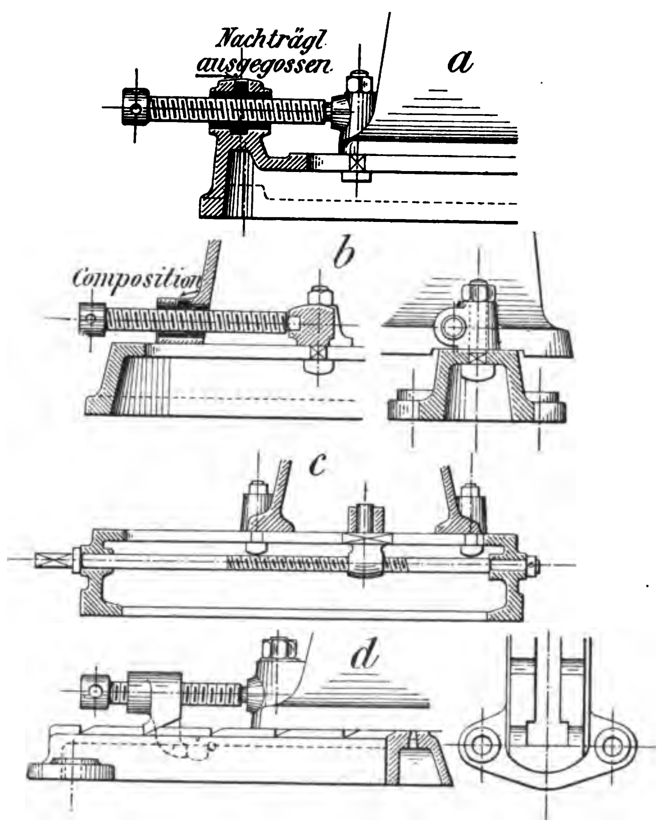


Fig. 173.

Verwendet man Viereckgewinde, wie dies ja auch am meisten vorkommt, so kann man sich das Gewindschneiden in der Mutter ersparen, indem man einfach mit Komposition ausgiesst.

VIII. Beschreibung ausgeführter Maschinen.

Nachdem wir in dem vorigen Kapitel die verschiedenen Konstruktionselemente einzeln besprochen haben, mögen zum Schlusse noch einige Schnittzeichnungen kompletter Maschinen folgen. In Anbetracht der Unvollständigkeit dieser Sammlung muss jedoch von einer Klassifikation nach Fabrikaten Abstand genommen werden und behandeln wir die einzelnen Maschinen nur nach ihrem sachlichen Zusammenhange.

Fig. 174—175 zeigen zwei Schnitte einer 2poligen Beleuchtungs-Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon, welche auch gleichzeitig als Repräsentantin einer grösseren Zahl von Maschinen betrachtet werden kann, deren charakteristische Eigenschaft in zwei magnetischen Stromkreisen mit direkt auf die Pole gesetzten Magnetspulen besteht. Als besondere Vorteile dieses Types sind zu nennen: Einfache und leichte Form und geringer freier Magnetismus (Streuung nach aussen hin), zwei Dinge, welche ihn hauptsächlich geeignet machen für kleine Motoren bis zu ca. 20 *PS*. In der That ist dies diejenige Maschinenform, welche vielleicht am häufigsten angetroffen wird. Die Armatur ist hier des besseren Aussehens wegen mit einer Tuchverkleidung versehen, welche durch zwei Bandagen am Commutator und am Armaturumfang gehalten ist.

Bei Fig. 176 und 177, einer mehr noch für hochgespannte Kraftübertragungen benützten älteren Maschine der Maschinenfabrik Oerlikon, sind ebenfalls zwei magnetische Stromkreise vorhanden, jeder derselben hat indessen seine eigene Magnetspule.

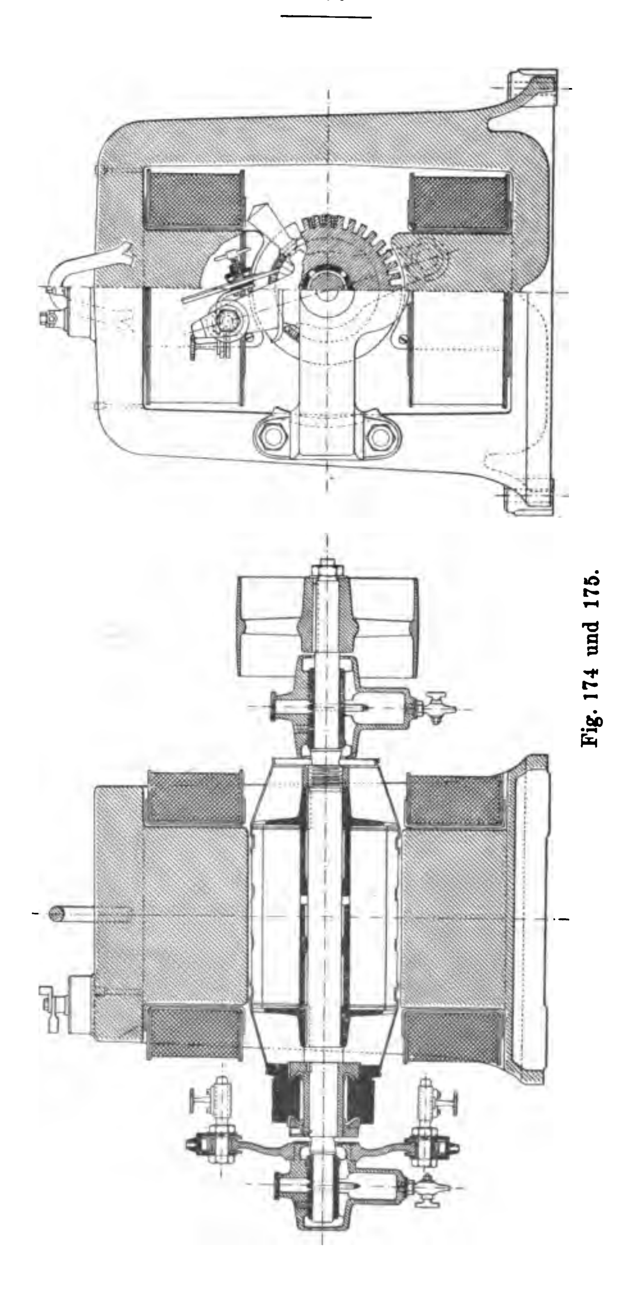


Fig. 174 und 175.

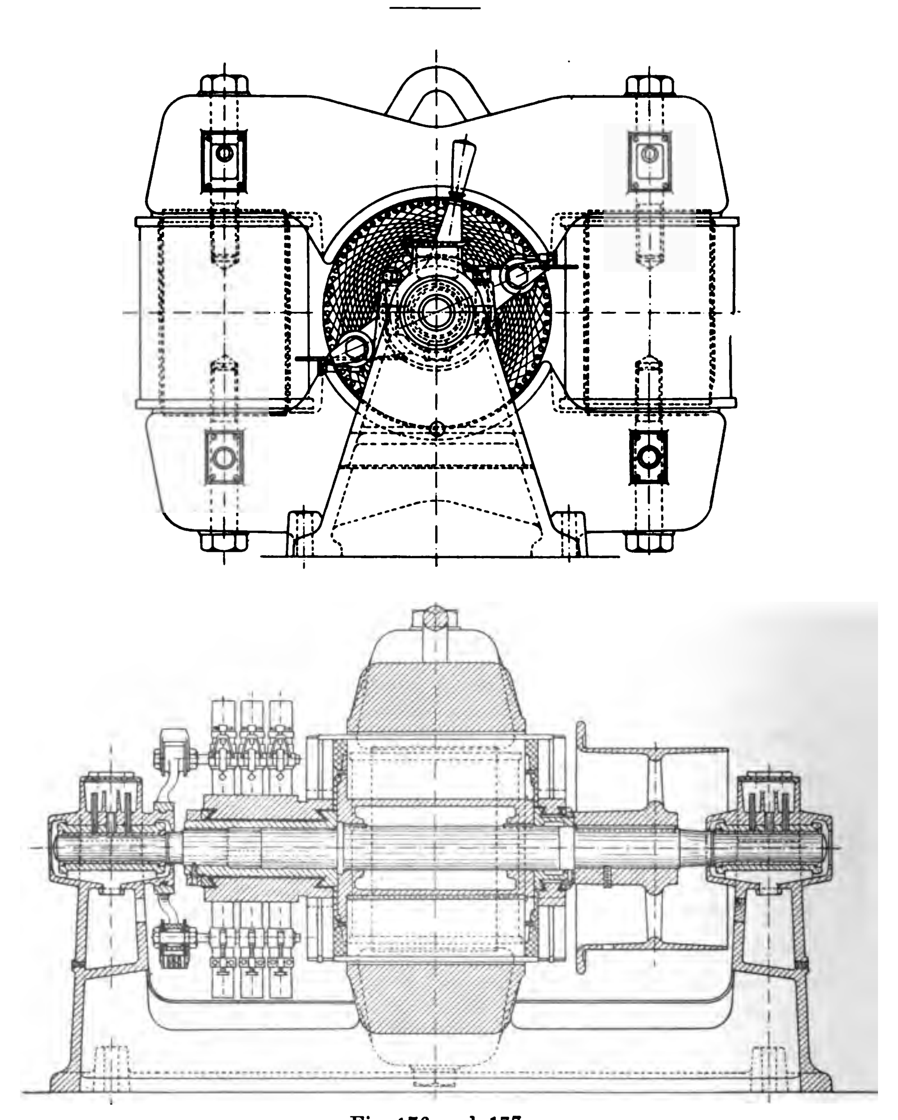


Fig. 176 und 177.

Bezüglich der Schmierung ist hinzuzufügen, dass bei sämtlichen neueren Maschinen die ursprüngliche Dochtschmierung den heutigen

Anforderungen gemäss durch Ringschmierung ersetzt ist. Diese unter dem Namen „Manchesterdynamo“ bekannte Form hat hauptsächlich vom ästhetischen Standpunkte aus ihr Bestechendes und wird trotz einiger ihr anhaftender Mängel, wie grösseres Gewicht, grössere magnetische Streuung, sehr viel gebaut. Würde es sich zwar darum handeln, eine Maschine mit minimalem Gewicht herzustellen, so liesse sich auch der Manchestertype zur Not vom gleichen Gewichte wie der erst angeführte konstruieren; mit Rücksicht auf ein dem Auge gefälliges Aussehen müssen jedoch der Form einige Konzessionen auf Rechnung des Gewichtes gemacht werden.

Dieser Type ist hauptsächlich durch die Firma Brown, Boveri & Co. zu seiner ästhetisch vollendetsten Ausbildung gelangt, wie die Photographie 178 zeigt. Die Detaille des Bürstenhalters und der Riemenspannvorrichtung wurde anlässlich der Fig. 160, 162 u. 173 besprochen. Die Armatur ist als Ring ausgebildet.

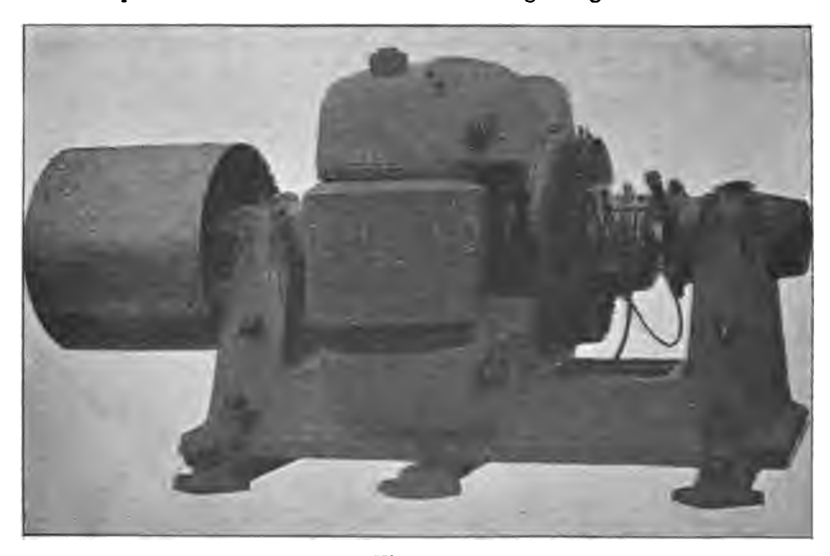


Fig. 178.

Vollständig abweichend von den bisherigen ist die 2polige eisenumschlossene Dynamo Fig. 179—182, welche der Verfasser

für die Usine J. Farcot in Paris entworfen hat und die hauptsächlich mit Rücksicht darauf entstanden ist, dass sie gleichzeitig

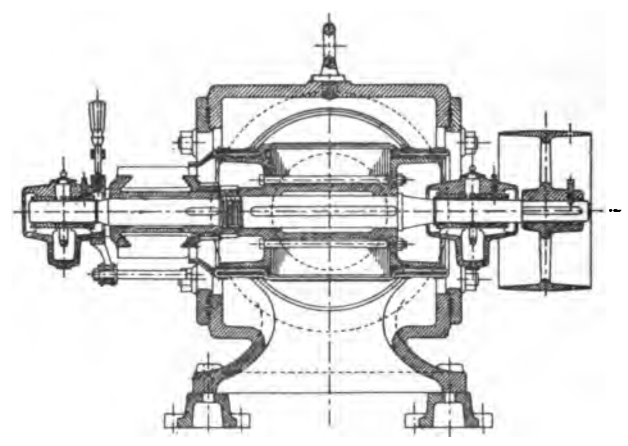


Fig. 179.

auch als Motor Verwendung finden soll. In diesem Falle ist es häufig erwünscht, dass die Maschine nach zwei Seiten hin möglichst

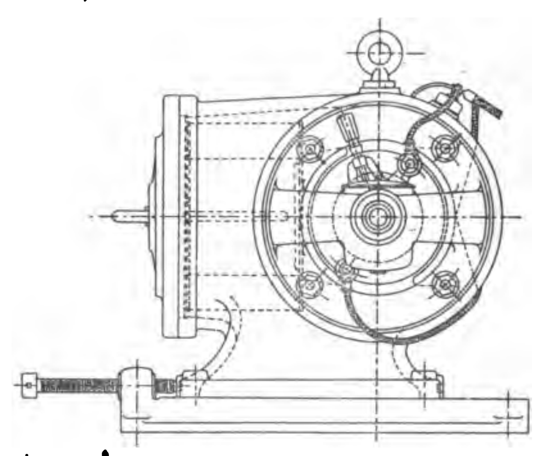


Fig. 180.

wenig Platz beanspruche. Die Magnete besitzen nur eine einzelne Spule, wodurch naturgemäss eine gewisse Dissymetrie des Feldes

hervorgerufen wird; dem ist jedoch durch eine in gleichem Verhältnisse stehende Verschiebung der beiden Bürstenhalter gegen

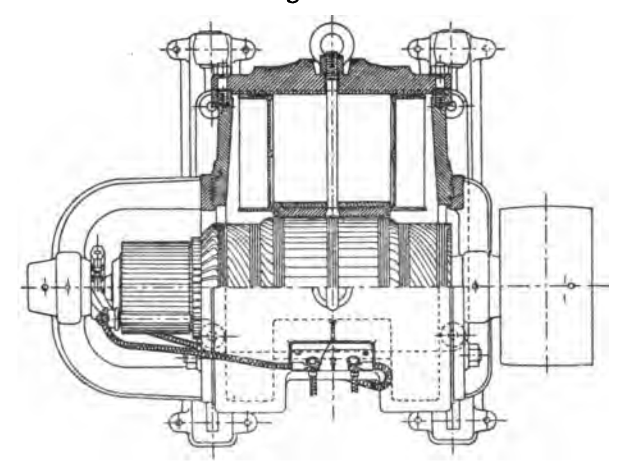


Fig. 181.

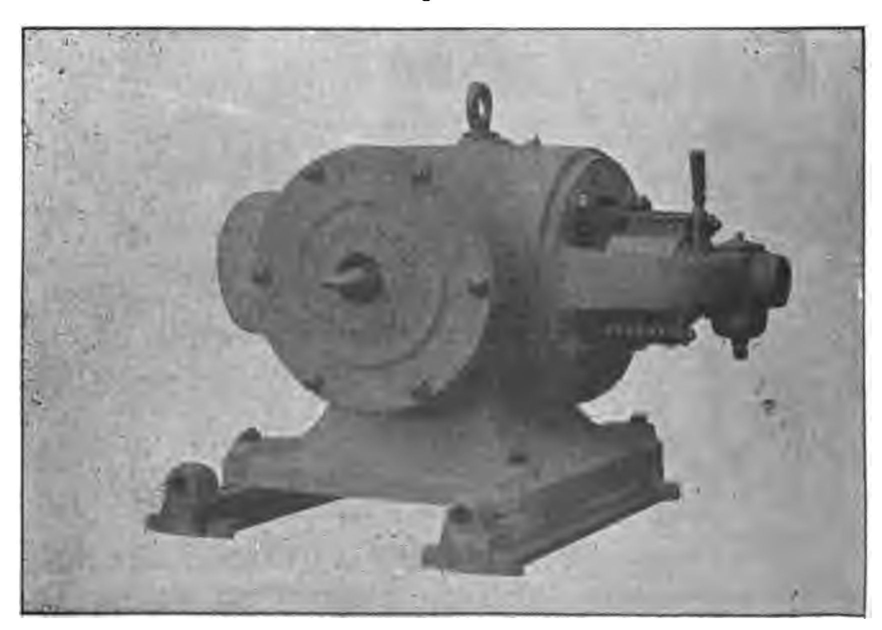


Fig. 182.

einander genügende Rücksicht getragen. Durch sorgfältig berechnete Abmessungen und Bewicklung konnte versuchsgemäss konstatiert werden, dass jede Maschinengrösse, ohne dass es notwendig wäre, die Bürsten zu verändern und bei vollständig funkenlosem Gang, von 0 bis auf 10 % Überlastung belastet werden darf.

Diese Erscheinung mag teilweise dem Umstande zu verdanken sein, dass die Querinduktion zufolge der Spaltung des Magnetkernes beinahe gänzlich aufgehoben ist; einen noch grössern Einfluss hat aber offenbar die Verteilung der Windungen einer Armaturspule auf verschiedene Zacken (S. 245).

Es muss hier noch beigefügt werden, dass die in Fig. 179 gezeichnete, nicht ganz einwurfsfreie Commutator-Konstruktion bei den wirklichen Ausführungen durch eine bessere ersetzt ist, bei welcher ein Nachspannen von aussen her erfolgen kann.

Wir gelangen nun zu den mehrpoligen Maschinen, welche sich im allgemeinen durch runde Form auszeichnen.

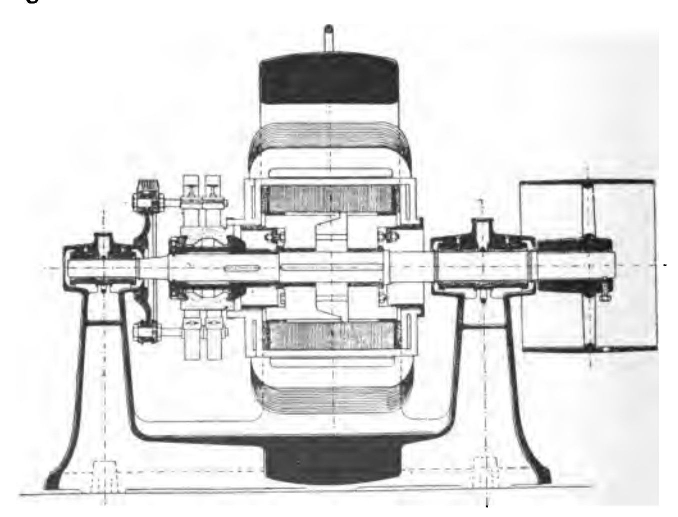


Fig. 183.

Fig. 183 und 184 bezieht sich auf eine 4polige Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon, deren Armatur im grösseren Massstabe durch Fig. 138 gegeben ist. Um dieselbe bequem heraus-

nehmen zu können, ist die obere Magnethälfte abnehmbar, eine Anordnung, die übrigens bei den meisten grösseren Maschinen wiederkehrt. Die Pole und der äussere Magnetkranz sind aus Grau-

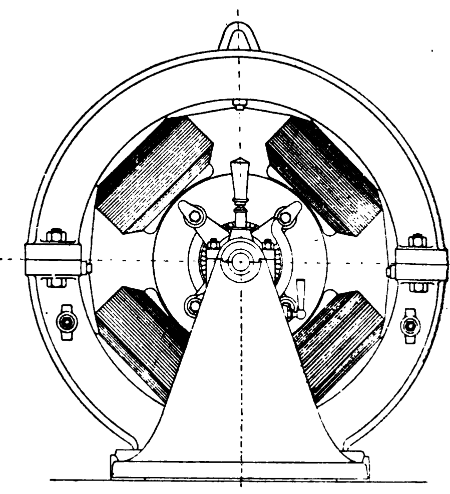


Fig. 184.

guss hergestellt und mit dem Lagerbock zusammengegossen. Besondere Polschuhe sind vermieden, um die Bearbeitung möglichst zu vereinfachen.

Sehr gefällige Formen hat auch die bekannte 4polige Maschine „Helvetia“ der Elektricitäts-Gesellschaft Alioth in Basel, Fig. 185 bis 187. Während der äussere Magnetkranz und der Sockel aus Gusseisen sind, wird für die Pole Stahlguss verwendet, um an Kupfer zu sparen.

Eine Eigentümlichkeit besitzen die Polschuhe, deren Kanten schief zu den Drähten stehen. Es ist leicht möglich, dass auf diese Weise die Bürstenverschiebung etwas reduziert werden kann, ohne notwendigerweise die Streuung zu vergrössern, wie dies eintritt, wenn man die Polspitzen näher zusammenrückt. Bemerkenswert ist auch die Armatur mit Ventilation und der mit Zahnkranz ver-

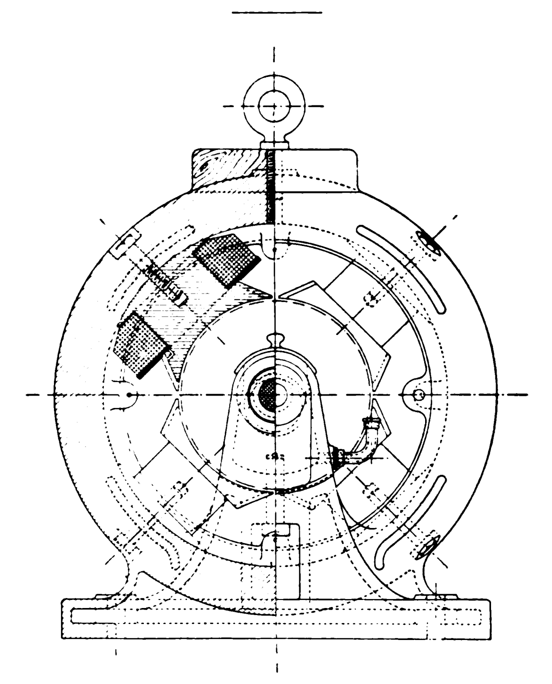


Fig. 185.

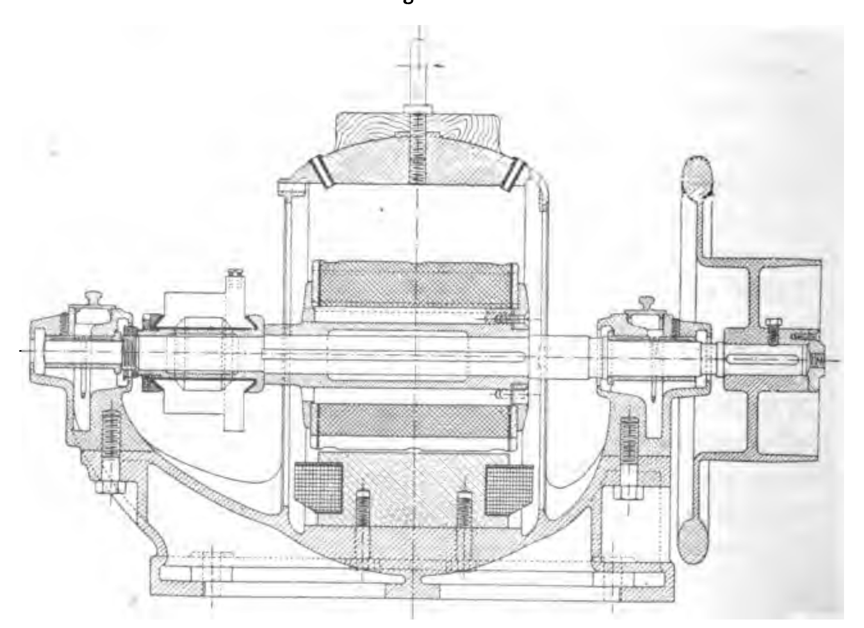


Fig. 186.

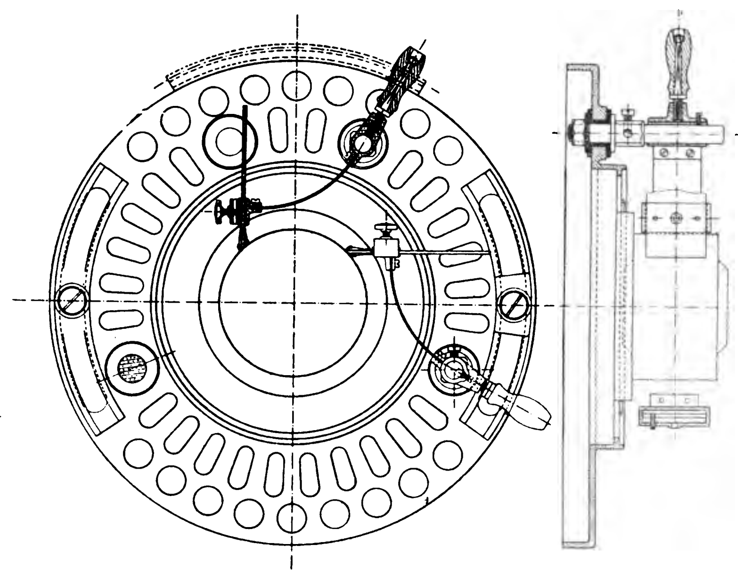


Fig. 187.

sehene Bürstenhalter Fig. 187, der zugleich als Verschalung dient. Bei dieser kleineren Maschine (15 *KW*) sind die Lager noch einteilig, die grösseren Modelle dagegen besitzen zweiteilige Lager und zweiteiligen Magnetkranz.

Eine ähnliche Konstruktion weist auch der 12 polige Tramwaygenerator für Basel (300 *HP*, 85 Touren) auf, Fig. 188 u. 189.

Die beiden nachstehenden Maschinentypen sind speciell mit Rücksicht auf die Armaturreaktion entstanden.

Fig. 190—193 geben verschiedene Schnitte und Ansichten der vom Verfasser für die Usine J. Farcot in Paris entworfenen 4 poligen Maschine. Der schädlichen Wirkung der Querinduktion wird hier durch tief in die Magnete eindringende Aussparungen entgegengetreten.

Besonders sei noch auf die Konstruktion der Armatur und der Wicklung aufmerksam gemacht. Die letztere besteht aus Kupfer-

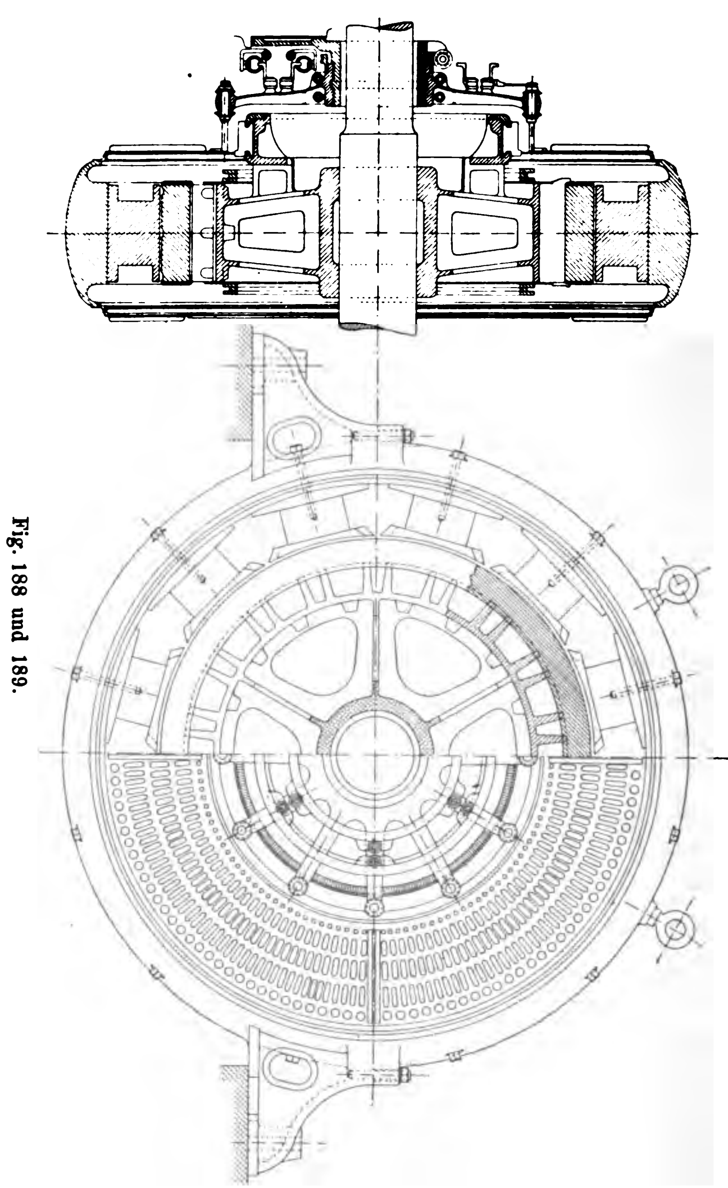


Fig. 188 und 189.

barren, welche auf der Seite der Riemenscheibe abgebogen sind und zwar wird hier der Wicklungsschritt nur mit einer Gabel ausgeführt, während die andere radiale Richtung hat. Auf diese Weise ist es möglich, jeden Armaturdraht einzeln auszuwechseln, ohne

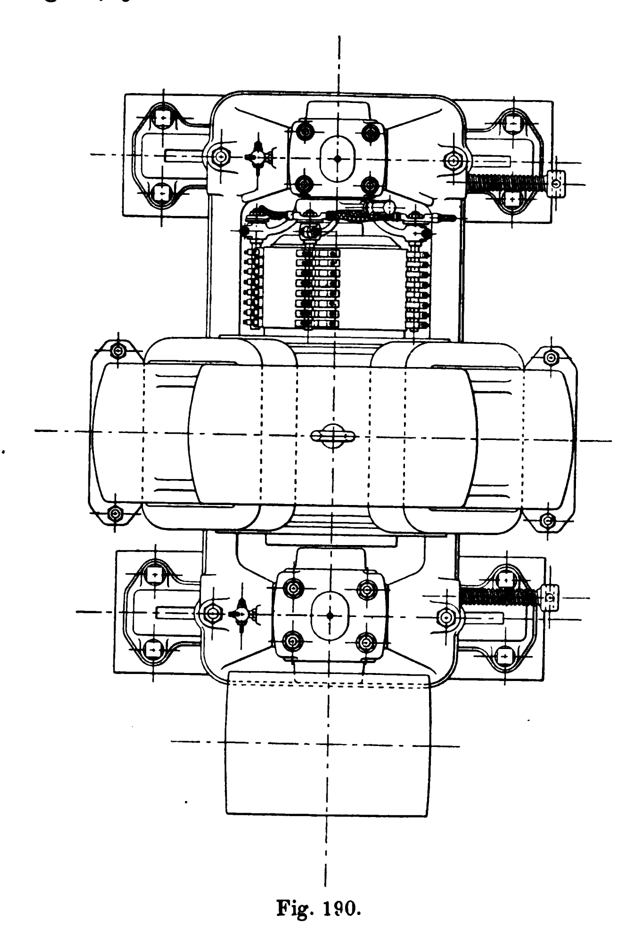


Fig. 190.

den übrigen Teil der Wicklung zu berühren, ein Vorteil, welcher bekanntlich nur bei Grammeringen angetroffen wird. Fig. 192 lässt auch die Einrichtung des Kohlenbürstenhalters erkennen.

Bei der Maschine von Couffinhal in St. Etienne (Fig. 194 und 195) ist die Querinduktion durch vollständige Teilung der Pole noch gründlicher umgangen (vergl. Fig. 122). Die Lager haben hier zwei Schmierringe.

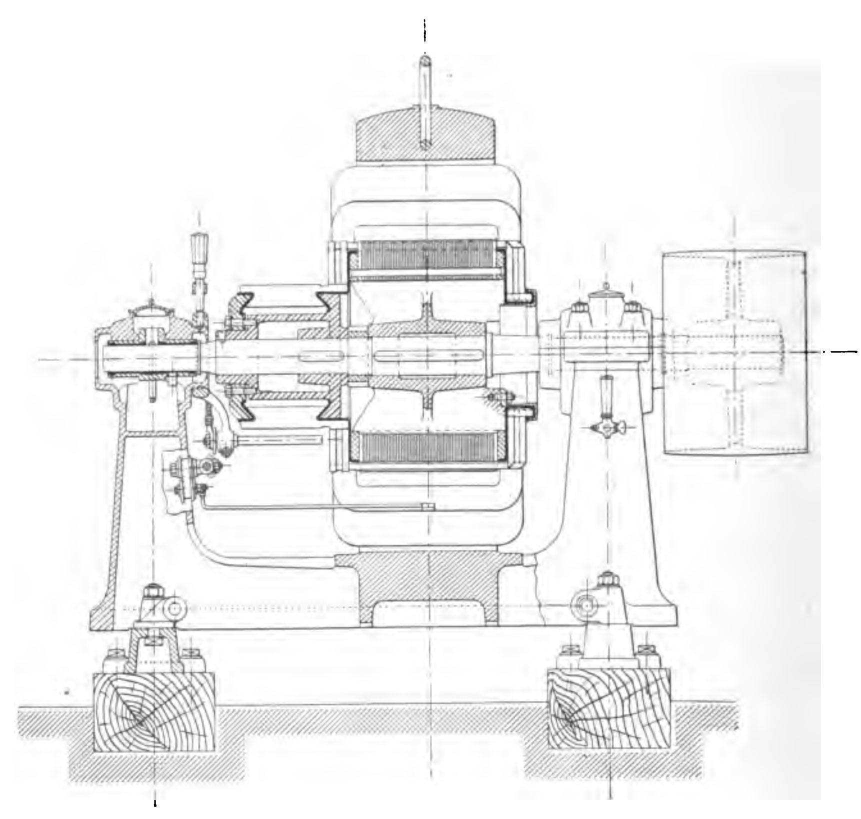


Fig. 191.

Von der Allmänna Svenska Elektriska Bolaget (Cie. Wenström), zur Zeit in Vesterås, rühren eine Menge bemerkenswerter Erfindungen auf elektrischem Gebiete her. Bekanntlich war Jonas Wendström einer der ersten Pioniere auf dem Ge-



Fig. 193.

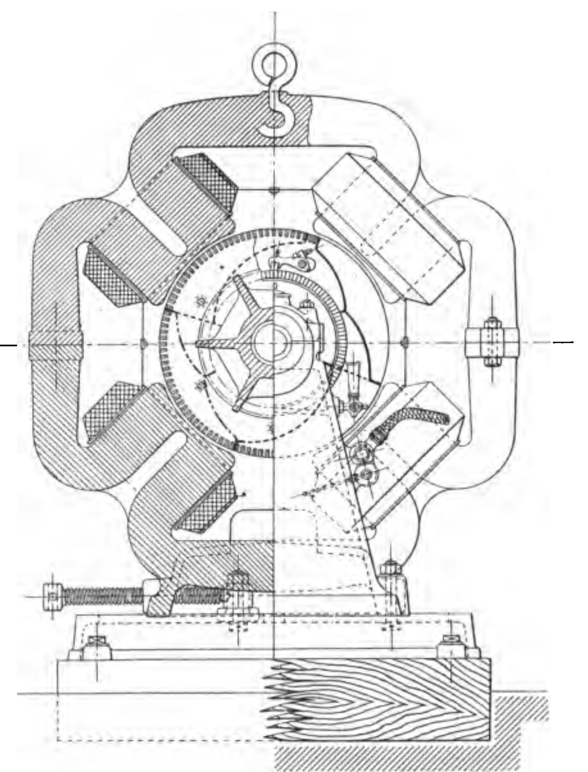


Fig. 192.

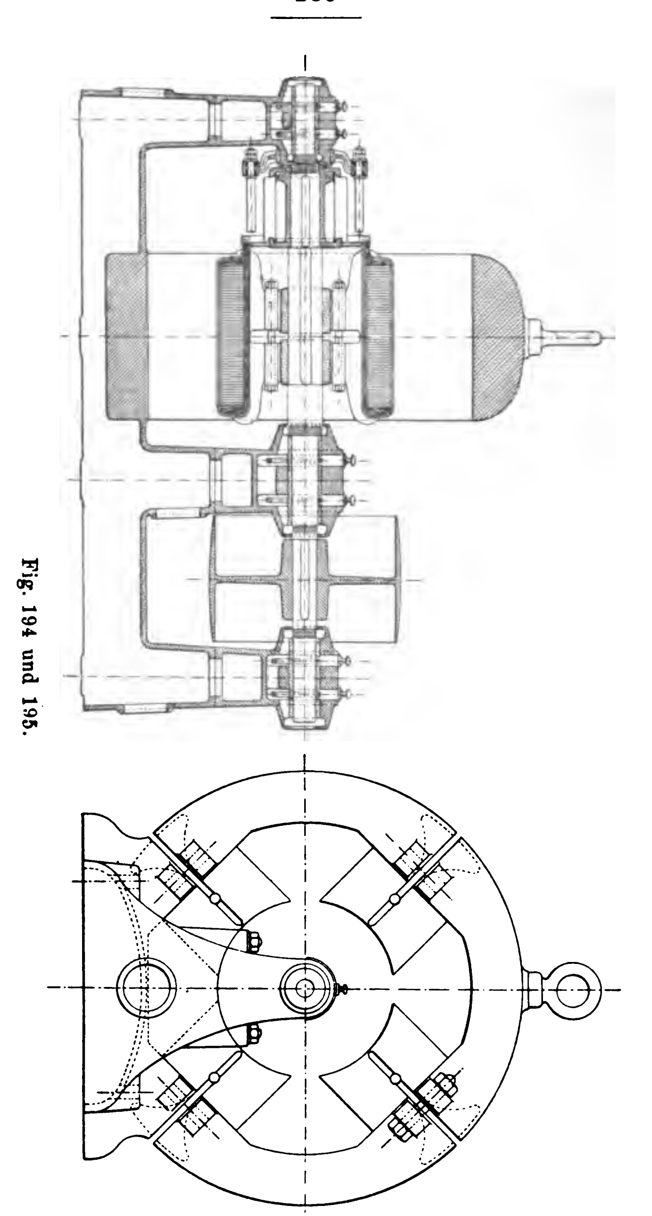


Fig. 194 und 195.

biete der elektrischen Traktion und des Drehstromes; er hat auch die ersten vollständig in Eisen geschlossenen Dynamos und Locharmaturen gebaut und darf gleicherweise als Erfinder des einspuligen Magnetfeldes, Taf. II, Fig. 36—39, betrachtet werden, das bei den Wechselstrommaschinen eine so grosse Rolle spielt*).

Taf. II, Fig. 23 stellt einen ältern Type dieser Firma dar, der gegenwärtig aufgegeben ist. Fig. 196—200 zeigen zwei neuere Modelle. Die erste dieser Maschinen ist für 115 *PS* bei 435 Touren, die zweite für 320 *PS* bei 235 Touren bestimmt. Magnetkranz und Pole sind aus Stahlguss und bilden ein Stück mit aufgeschraubten Polschuhen.

Das schon bei den Alioth'schen Maschinen beobachtete Bestreben, alle Bearbeitungsflächen, so viel als möglich, auf der Bohrbank herzustellen, tritt auch hier zu Tage. Grosse Sorgfalt weist die Konstruktion der Lager auf mit zwei Schmierringen und in der Mitte kugelförmigen Lagerschalen; desgleichen ist der Bürstenhalter der grösseren Maschinen sehr gediegen und solid ausgeführt. Der mit Löchern versehene Anker besitzt ausser den Hauptwicklungen noch eine Sayer'sche Kompensationswicklung (siehe S. 36), womit bei normaler und selbst bedeutender Überbelastung ein absolut funkenloser Gang gesichert wird, ohne dass die Bürsten verschoben werden müssen.

Die Cie. de l'Industrie Electrique (Société Thury) in Genf baut seit Jahren einen Maschinentype (Fig. 201—202), welcher sich durch die Eigenart seiner Magnete auszeichnet. Die Specialität dieser Gesellschaft bilden hochgespannte Gleichstromkraftübertragungen; aus der grossen Zahl ausgeführter Anlagen citieren wir nur einige wenige, welche durch die ungewöhnlich hohe Span-

*) Siehe „Några framsteg på starkströmsteknikensområde under de senaste åren“ von Ing. Rob. Dahlander, Teknisk Tidskrift, Stockholm 1896, ferner Lumière Electrique, 1886, Band 2, Seite 21.

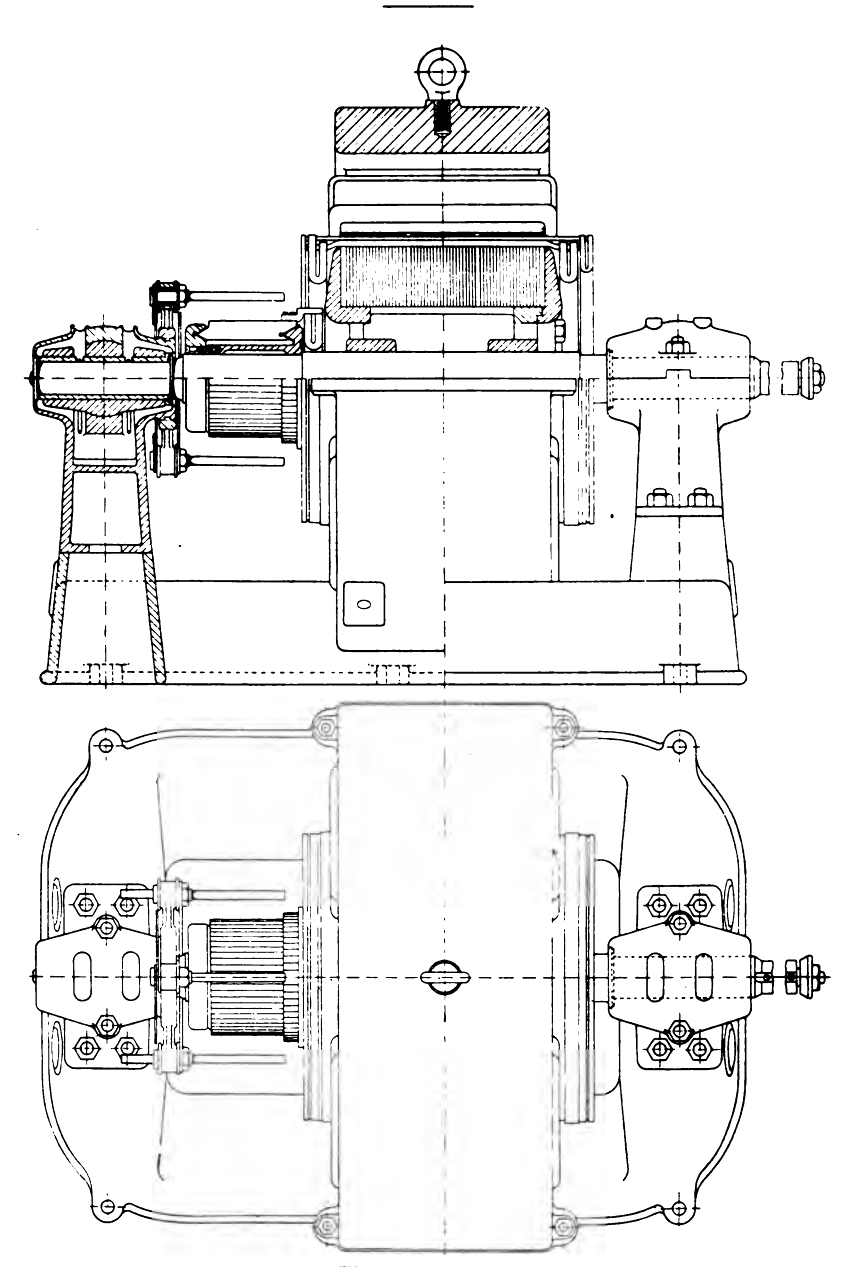


Fig. 196 und 197.

nung auffallen. So z. B. läuft die Anlage in Biberist seit vier Jahren ununterbrochen mit 3500 Volt und wird nur alle Sonntage abgestellt. Zu bemerken ist noch, dass diese Maschinen selbst mit

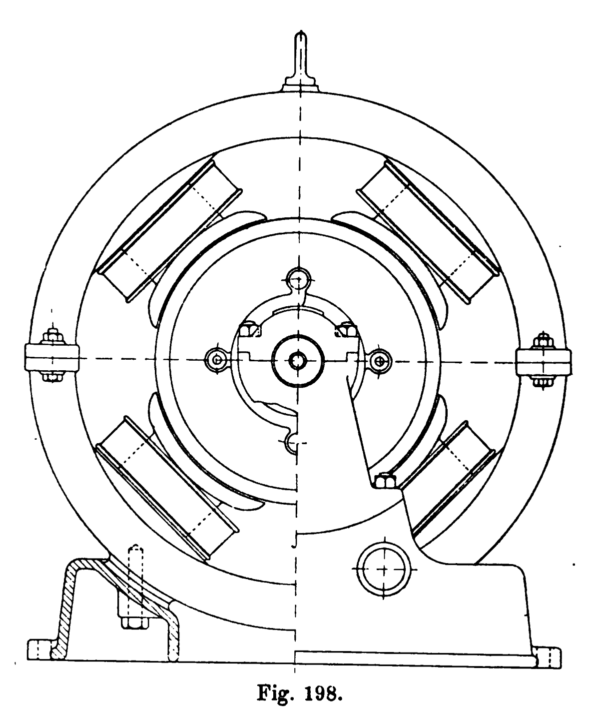


Fig. 198.

5000 Volt probiert wurden, eine in der Geschichte der Gleichstrommaschine unerhörte Spannung.

Im allgemeinen werden Kraftübertragungsmaschinen mit Seriewicklung ausgeführt, Thury hat indessen auch Nebenschlussmaschinen von 1600 (!) Volt gebaut (Kraftübertragung Stanserhorn).

Sehr interessant ist das von dieser Gesellschaft benutzte System hintereinander geschalteter Seriemotoren mit konstanter Stromstärke, bei welcher die Konstanz der Tourenzahl

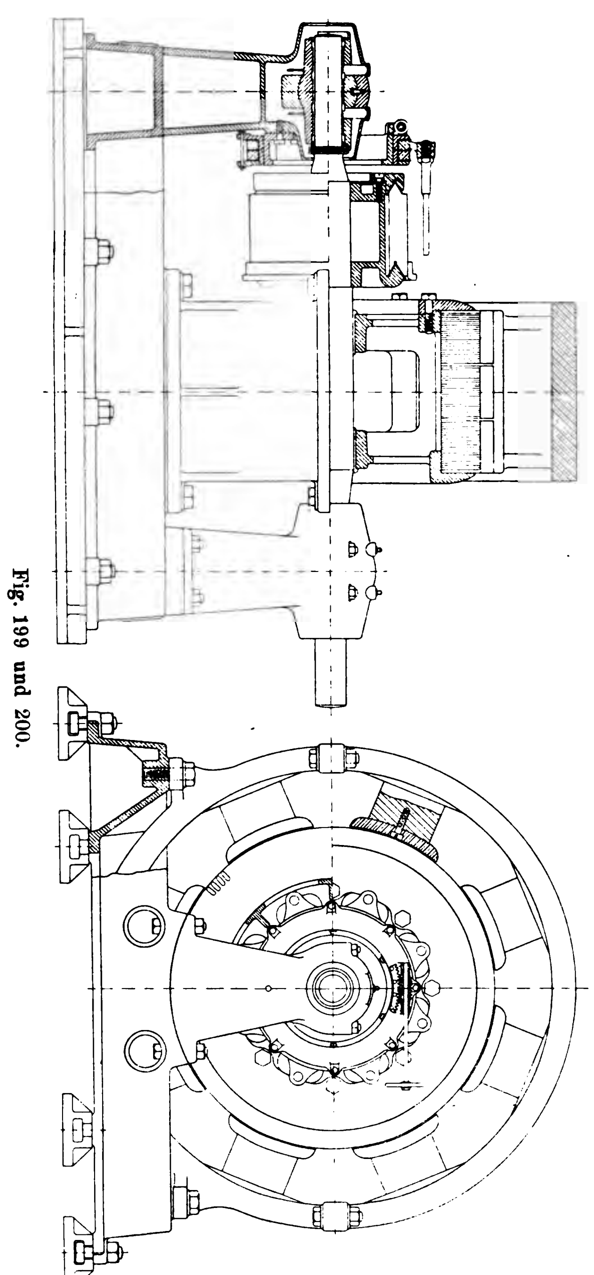


Fig. 199 und 200.

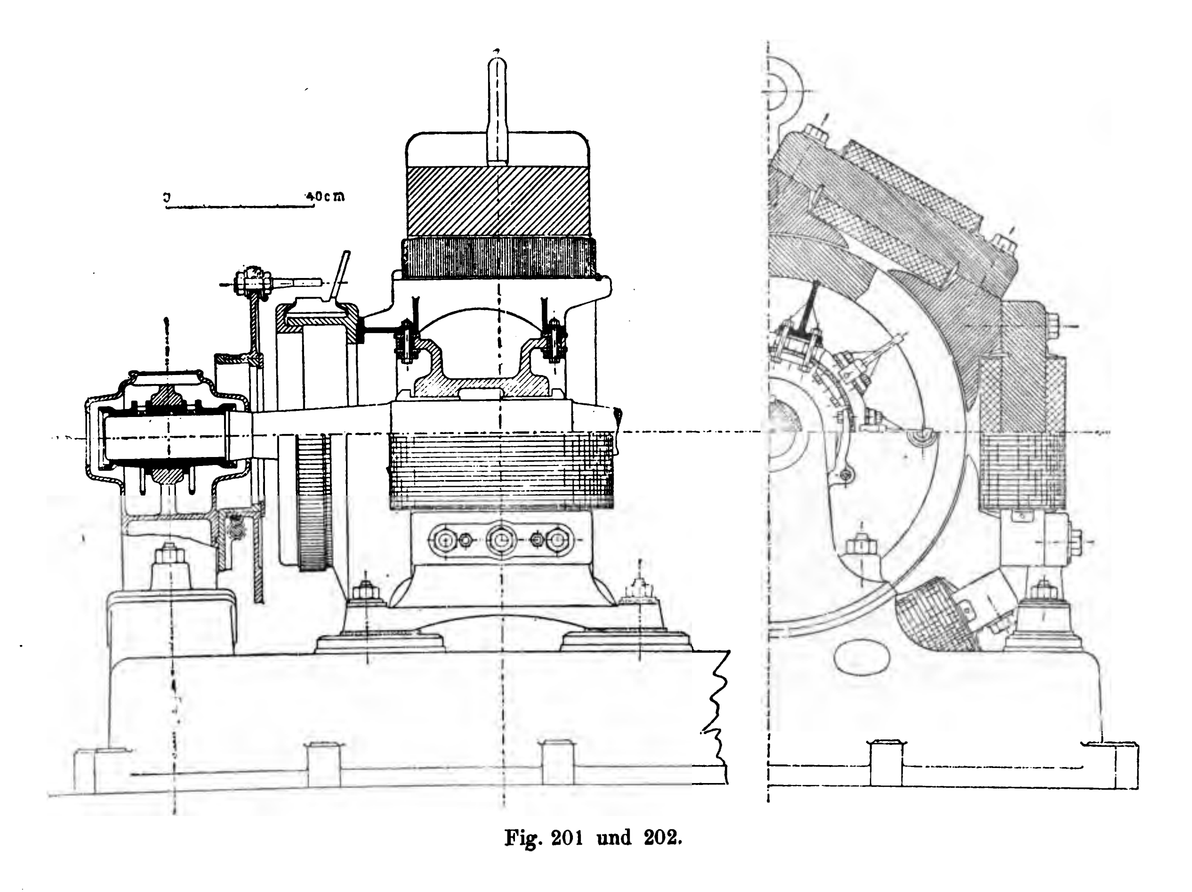


Fig. 201 und 202.

durch mechanische Geschwindigkeitsregulatoren, die mehr oder weniger Magnetwindungen einschalten, erreicht wird (siehe Photo-

Fig. 203.

graphie eines solchen Motors in Fig. 203). Bei der ersten und bekanntesten derartigen Kraftübertragung in Genua sind drei



Generatorstationen vorhanden; die Zahl der Motoren beträgt 22 und die totale Spannung 8500 Volt. Noch höher ist die Spannung bei der Anlage La Chaux-de-Fonds und Locle (acht Einheiten mit 14400 Volt zusammen).

Selbstverständlich müssen bei so hohen Spannungen nicht nur die Armatur, sondern auch die Magnete sorgfältig von dem Gestell isoliert werden. Eine weitere Sicherheitsmassregel besteht noch darin, dass diese Maschinen nicht auf Holz, sondern auf umgestülpte Porzellanisolatoren montiert werden.

Für Spannungen bis zu 1800 Volt wendet Thury Trommeln, bei höheren Spannungen Ringarmaturen an. Besonders charakteristisch sind die Magnete aus gewalztem Eisen. Die Fabrikationsweise hat hiebei zur Aufstellung einer begrenzten Zahl Profile verschiedener Durchmesser geführt und es müssen folglich die intermediären Grössen durch entsprechende Verlängerung der Armatur erreicht werden.

Die nachstehende Tabelle enthält einige Angaben über die verschiedenen Grössen der Maschinen Thury.

PS	25—30	50—100	100—200	300—400	500—600	800	1000	1500
Touren . .	—	450	375	315	275	240	180	150
Pole . . .	4	6	6	6	8	8	10	12
Ausbohrung m/m	—	580	750	1250	1500	1750	2200	2500

Anmerkung. Die vertikalen Generatoren der Mont Salève Bahn sind z. B vom zweit grössten Modelle. Die elektrischen Daten sind wie folgt:

Spannung = *600* Volt,

Strom = *275* Amp.,

Touren = *45*,

Armatur = *451* Spulen à 4 Drähte parallel, Draht 3,3 m/m nackt,

Collector: *1800* m/m Durchmesser,

451 Lamellen,

12 Bürstenstifte à 3 Bürsten (Fig. 167),

Magnete: $\beta = 0,8$,
Drahtdurchmesser *7,5* m/m,
Stromstärke *100* Amp. } separate Erregung.
Spannung *100* Volt }

Zum Schlusse geben wir noch in Fig. 204—206 Schnitte und Ansicht einer vertikalen Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon. Diese Fabrik war vielleicht die erste, welche mit der Konstruktion vertikaler Maschinen begann und hat sich durch ihre zahlreichen und grossartigen Anlagen einen besondern Ruf geschaffen.

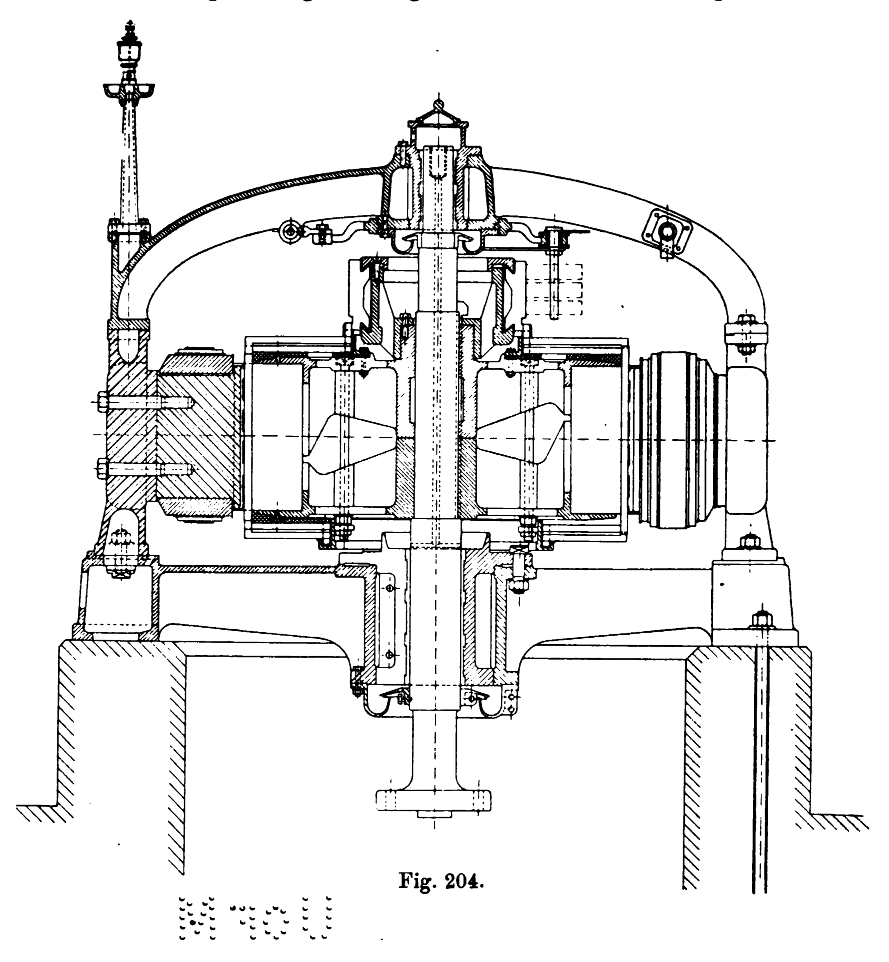


Fig. 204.

Die in Frage stehende kleinere 6polige Dynamo von 120 *PS* dient zur Erregung der Generatoren (Thury) für die Kraftübertragung Chèvres-Genève. Das Gewicht der Armatur wird, wie ersichtlich, durch die Turbine aufgenommen. Von den beiden Lagern ist das untere zweiteilig und von gleichem Durchmesser, wie der Flansch der Welle, um die letztere nach oben herausnehmen zu können. Die Schmierung erfolgt separat von den auf einem Ständer

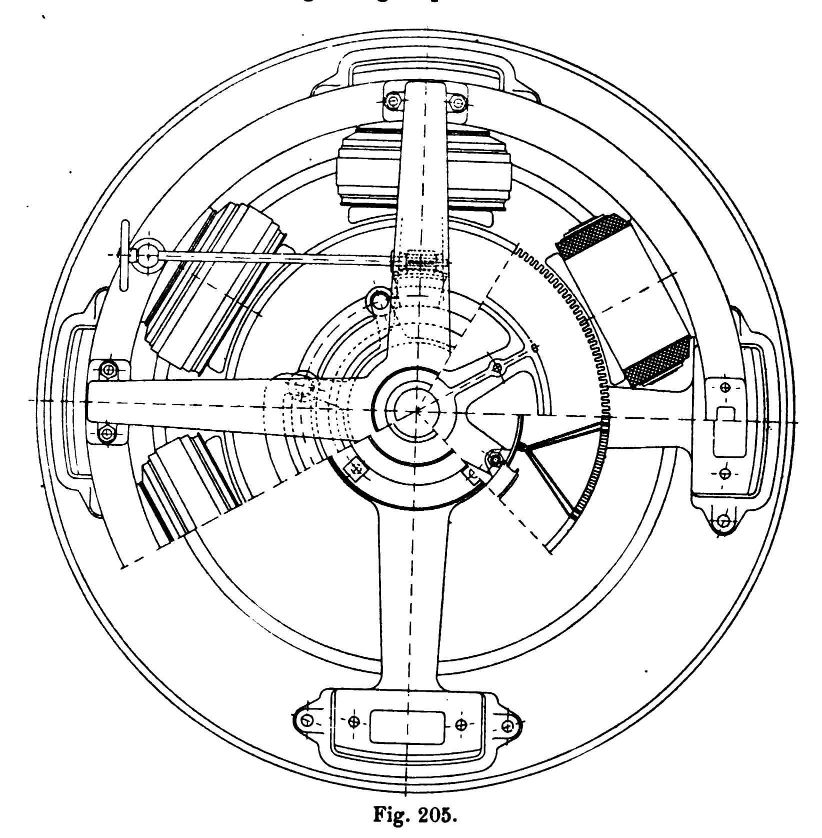


Fig. 205.

montierten Tropfschmierbechern aus und zwar für das obere Lager direkt, für das untere durch die ausgebohrte Welle. Unter jedem Lager sind Fangschalen für das abtropfende Öl angebracht. Bei

der Wicklung sind die bereits auf Seite 242 erwähnten Prinzipien verfolgt. Da der Commutator besonderer Umstände halber auf der

Fig. 206.

obern Seite disponiert werden musste, so ist die Wicklung hier mit einer Tuchverkleidung versehen.



IX. Gewichte und Kosten von Dynamos.

A. Gewichte.

Eine Vergleichung verschiedener Fabrikate ist nur möglich, wenn die Maschinen gleiche Tourenzahl besitzen. Da nun die Leistung innert nicht allzugrosser Grenzen proportional der Tourenzahl ist, so sind in Nachstehendem sämtliche Angaben auf 1000 Touren (spec. Leistung) bezogen.

Die angehängte Tafel III enthält eine Anzahl Gewichtsangaben verschiedener moderner Fabrikate. Es ist einleuchtend, dass der Hufeisentype verhältnismässig schwerer wird, als die übrigen Modelle, dagegen fällt das überaus grosse Gewicht der Maschine von Lahmeyer auf, das keineswegs durch die Form begründet ist, denn wir sehen anderseits, dass die elektrischen Krahnmotoren von Oerlikon nicht einmal halb so schwer sind. Allerdings ist hier beizufügen, dass letztere Motoren aus Stahlguss hergestellt und nur für kürzere Betriebsdauer berechnet sind, dagegen weisen auch die 2 poligen Motoren von Schuckert ein bedeutend geringeres Gewicht auf. Eine Erklärung wird wahrscheinlich in der Temperaturverschiedenheit dieser Maschinen zu suchen sein, über deren maximale zulässige Grenze allerdings noch abweichende Ansichten herrschen (siehe Seite 51, die Temperatur des Maschinenhauses ist zu 25° angenommen); ferner scheinen diese Maschinen mit geringer Drahtzahl und grosser Linienzahl zu arbeiten, es liegt darin eine gewisse Garantie für funkenlosen Gang.

Die Gewichtsfrage ist übrigens von ebenso grosser Bedeutung für den Käufer als für den Fabrikanten, weil davon

1. der Reingewinn abhängt, und
2. schwere Maschinen oft einen niedern magnetischen Sättigungsgrad verraten, dessen Übelstände zu verschiedenen Malen erörtert wurden.

Man wird deshalb stets darnach trachten, das Gewicht thunlichst zu vermindern.

Die Kurven zeigen deutlich die Vorteile der mehrpoligen Maschinen gegenüber 2poligen.

Einzelne Fabrikanten bauen deshalb überhaupt nur mehrpolige Maschinen und zwar schon von 1 KW (spec. Leistung) an. Im allgemeinen jedoch sind die Grenzen für 4, 6 und 8polige Maschinen wie folgt:

4polige	von	6—20	Kilowatt (spec. Leistung) an;
6 „	„	100	„ „ „ „
8 „	„	200—300	„ „ „ „

Bei der Berechnung von Projekten oder ganzer Serien gleicher Maschinen darf angenommen werden, dass das Gewicht eines bestimmten Types mit der specifischen Leistung in der Potenz $^2/_3$ zunimmt, d. h.

$$\text{Gewicht} = c \,.\, W_s^{2/3} \,.\, kg \text{ (vergl. Formel 29).}$$

c variiert zwischen 160—200 für Maschinen mit 2 Lagern,
W_s Leistung bei 1000 Touren.

Für ein drittes Lager sind noch ca. 15 % hinzuzurechnen.

Nachstehend einige approximative Angaben über Gewichte von Lagern nach der in Fig. 126 gegebenen Konstruktion. In diesen Gewichten ist nur der obere Teil bis und mit dem Boden des Ölbehälters enthalten; das Gewicht des Ständers dagegen variiert zu sehr mit der Lagerhöhe und muss separat berechnet werden.

Wellendurchmesser in m/m	30	50	100	150	200	250	300	350	400
Lagerschalenlänge in m/m	100	165	330	420	500	580	620	720	800
Gewicht in kg	**35**	**60**	**100**	**200**	**400**	**660**	**1100**	**1500**	**2200**

Das **Gewicht der Armatur** beträgt zwischen 12—32 % vom Totalgewicht. Bei mehrpoligen Maschinen ist dasselbe grösser als bei 2 poligen.

Für eine approximative Bestimmung und unter Voraussetzung, dass die Zahl der Pole, wie oben angegeben, mit der Leistung zunimmt, gilt ungefähr nachstehende Tabelle:

Totalgewicht kg	Gewicht der Armatur
200	12 %
500	16
1000	19
2000	22
6000	25
10000	26
20000	28
50000	30
100000	32

Das relative Gewicht des Commutators ändert sich zu sehr mit der Stromstärke, als dass sich hiefür eine allgemeine Regel aufstellen liesse.

Armatursterne:

115. $$\text{Gewicht} = c \, . \, W_s^{2/3} \, . \, \text{kg},$$

wobei c wie folgt einzusetzen ist:

Für Armatursterne ohne Arme (Hülsen) . . . . . 3—4,
„ „ mit dünnen Speichen ohne Versteifung 8—10,
„ „ „ versteiften Speichen . . . 12—14,
„ Ringarmaturen mit gusseiserner Nabe und Speichen
und spec. Broncekranz . . . . 15—20.

Im letzteren Falle entfällt auf den Broncekranz ungefähr die Hälfte des Gewichtes.

Eisenscheiben:

116. $$\text{Gewicht in kg} = \frac{D^2 \pi}{4000} \, l \, \gamma \, (1 - \tau^2) \, 7{,}5$$
$$= \text{rund } 0{,}006 \, D^2 \, l \, \gamma \, (1 - \tau^2).$$

γ = Querschnittsverminderung durch die Papiereinlage, sowie die Zacken etc.
= *0,85—0,9* für glatte Armaturen,
= *0,75—0,85* für Zackenarmaturen,

$$\tau = \frac{\text{äusserer Armaturdurchmesser}}{\text{inneren Durchmesser}}; \quad \frac{\text{innerer Armaturdurchmesser}}{\text{äusseren Durchmesser}} \qquad \text{(S. 63.)}$$

Kupfer:

Nach Gleichung 25 ist

$$\text{Gewicht in } kg = 0{,}45 \frac{W}{i^2}.$$

W = Wattverlust in Kupfer,
$i = 90\ \varepsilon$ Ampère pro m/m^2.

Gewichte von Riemenscheiben.

Die nachstehende empirische Formel ist aus einer grösseren Zahl von Riemenscheiben von *0,1 — 3* m/ mit Ausbohrungen bis zu 23 c/m abgeleitet.

$$\text{117.} \qquad \text{Gewicht in } kg = c \,.\, \mathfrak{b} \,.\, D^2.$$

$\mathfrak{b}$ = Breite in c/m,
D = Durchmesser in c/m.

Tabelle von *c*.

D in c/m	c	D in c/m	c
10	0,00130	70	0,00080
15	0,00100	100	0,00076
25	0 00095	150	0,00073
50	0,00085	225	0,00070

Die obige Formel gibt sehr gute mittlere Resultate, die grössten Abweichungen betragen kaum 15 % über oder unter dem berechneten Gewicht.

Eine Riemenscheibe von 100 c/m Durchmesser und 50 c/m Breite hat beispielsweise ein

$$\text{Gewicht} = 0{,}00076 \,.\, 50 \,.\, 100^2 = 380\ kg.$$

Gewicht des **Magnetkranzes.**

Das Gewicht des eigentlichen Magnetkranzes ohne Gestell und Lager lässt sich mit etwelcher Annäherung aus der Kraftlinienlänge L und den Querschnitten S wie folgt bestimmen:

$$118.\quad \text{Gewicht in } kg = \left(L_m \cdot S_m + L_m{}' \cdot S_m{}' + L_m{}'' \cdot S_m{}'' + \ldots\right) \frac{7{,}2}{1000}.$$

Für Stahlgussmagnete ist 7,2 durch 7,8—7,9 zu ersetzen.

B. Dimensionen.

Die nachstehenden Tabellen beziehen sich nicht auf ein spezielles Fabrikat, sondern sind als Mittelwerte einer grösseren Zahl von Maschinen zu betrachten. Sie mögen deshalb bei Projektzeichnungen ganz gute Dienste leisten.

W_s = spec. Leistung in KW.

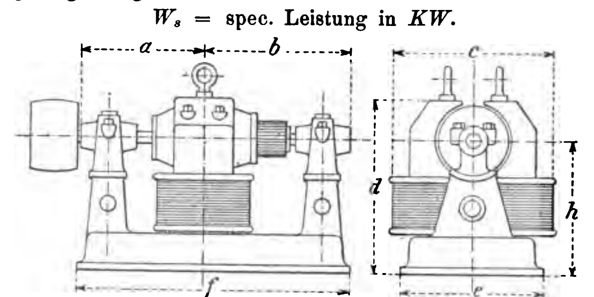


Fig. 207

Aufrechtstehender Hufeisentype.

W_s	1	2	4	8	12	20	30	50	75	100	150
a	220	270	330	400	440	490	540	625	710	785	910
b	380	460	530	600	650	720	785	890	985	1060	1160
c	310	380	440	520	570	660	740	860	960	1050	1130
d	310	420	500	590	650	750	850	980	1100	1200	1300
e	280	340	400	470	520	600	680	790	885	960	1050
f	630	720	850	980	1060	1190	1300	1480	1650	1790	2000
h	280	340	400	470	520	600	680	790	885	960	1050

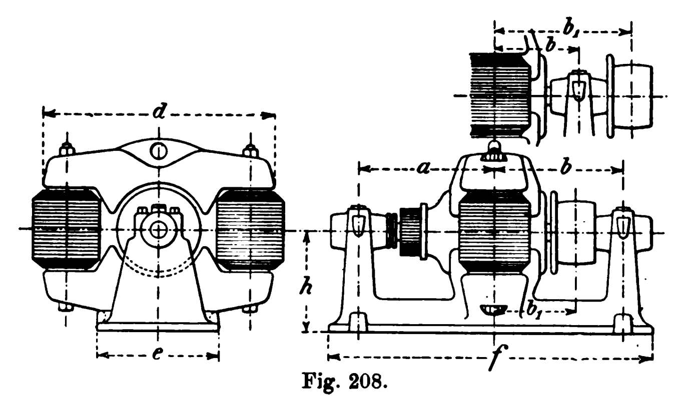


Fig. 208.

Manchester-Dynamo.

W_e	1	2	4	8	12	20	30	50	75	100	150
a	230	290	340	410	470	550	620	700	735	750	780
b	230	290	340	410	470	550	620	— (700)*)	— (735)	—	—
b_1	150	180	225	280	320	380	430	720 (500)	790 (550)	840	910
d	500	600	680	770	820	950	1050	1200	1360	1485	1670
e	180	210	250	310	350	410	465	555	650	730	850
f	550	720	870	1060	1180	1340	1480	1290 (1690)	1460 (1860)	1580	1800
h	150	180	225	280	320	380	430	500	550	580	630

Pulley fliegend. (gilt für die Spalten 50 bis 150)

*) Die eingeklammerten Zahlen gelten für den Fall, wo die Riemenscheibe zwischen zwei Lagern liegt.

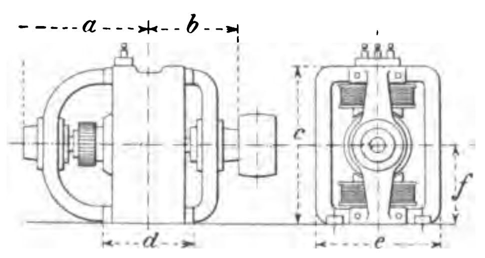


Fig. 209.

Aufrechtstehender 2 poliger Type.

W_s	0,4	0,7	1	1,5	3	5	8	12	15	18
a	260	290	310	335	390	445	510	585	635	680
b	176	200	210	230	276	320	365	415	450	475
c	395	420	445	475	535	576	640	690	720	745
d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
e	245	275	290	320	380	430	495	550	575	600
f	$f = \frac{c}{2}$ + kleiner Zuschlag.									

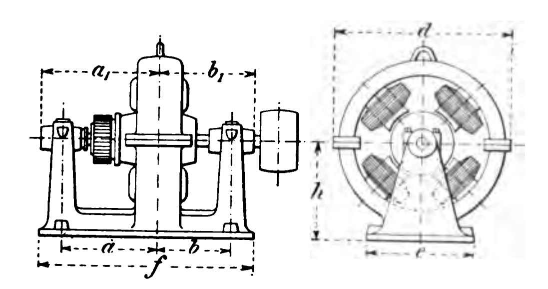


Fig. 210.

Vielpolige Dynamo (4 polig).

W_s	10	20	30	50	75	100	130	160	200
a	460	470	490	530	580	610	700	730	790
a_1	575	600	620	670	725	780	860	930	970
b	314	330	340	370	400	430	470	490	510
b_1	450	470	485	515	555	600	650	675	700
c	570	600	630	670	720	780	860	930	970
d	830	865	900	975	1065	1150	1210	1260	1340
e	505	530	550	595	650	700	790	870	970
f	1020	1070	1120	1225	1350	1480	1510	1540	1590

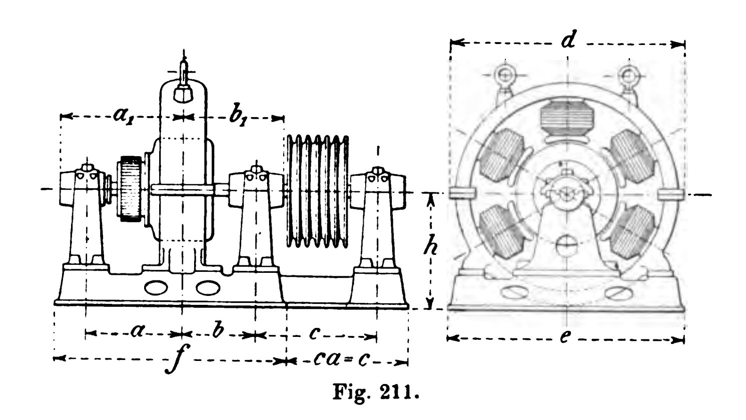


Fig. 211.

Vielpolige Dynamo (Type à 6, 8 und mehr Pole).

W_s	300	500	750	1000	1500	2000	2700
a	830	860	900	970	1000	1040	1100
a_1	1030	1090	1125	1170	1220	1270	1330
b	510	560	615	665	710	750	790
b_1	740	780	845	900	950	1000	1050
c	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1500
d	1500	1850	2250	2600	3100	3400	3600
e	1300	1600	2000	2400	2900	3200	3400
f	1700	1890	2120	2300	2580	2770	2960
h	1540	1700	2000	2140	2400	2600	2800

C. Calculation.

Die nachstehenden Angaben über Selbstkosten sind natürlich nur innert weiterer Grenzen zuverlässig und unterliegen je nach der örtlichen Lage und den Lohnverhältnissen mehr oder weniger grossen Modifikationen. Zu bemerken ist auch, dass bei der Quotierung der Arbeitslöhne eine Fabrikation von mehreren gleichartigen Maschinen auf einmal vorausgesetzt wurde. Handelt es sich nur um eine Maschine, so ist ein entsprechender Zuschlag zu machen. Ferner sind die Modelle nicht inbegriffen.

Die Selbstkosten setzen sich wie folgt zusammen:

1. Preis des Rohmateriales nebst Zuschlag für Lagerung, Abgang und Transport,
2. reine Arbeitslöhne,
3. allgemeine Unkosten, welche gewöhnlich in Prozenten der Arbeitslöhne veranschlagt werden.

Ganz allgemein verteilen sich die Gewichte der Materialien ungefähr in folgendem Verhältnis:

Gusseisen oder Stahlguss 70—80 % des Totalgewichtes,
Schmiedeisen . . . . 3—5 % " "
Eisenscheiben . . . . 8—12 % " "
Bronce . . . . 2—5 % " "
Kupfer . . . . 8—11 % " "

Für die Materialpreise sei auf die nachstehende Tabelle verwiesen. Der Zuschlag betrifft den durch die Bearbeitung verloren gehenden Prozentsatz, der sozusagen als wertlos zu betrachten ist, den Kupferdraht nicht ausgenommen. Letzterer muss etwa 2—3 % länger als nötig bestellt werden und hat gewöhnlich keine Verwendung mehr.

Mittlere Materialpreise von Dynamomaschinen.

Material	Spec. Gewicht	Zuschlag auf das bearbeit. Gewicht	Rohpreis pro kg in Franken
1. **Eisen:**		%	
Gewöhnlicher Grauguss .	7,2	5—7	—. 25 bis —. 35.
Stahlguss	7,8—7,9	6—8	bis 50 kg —. 75 bis 1. —.
			" 100 " —. 65 " —. 75.
			über 100 " —. 50 " —. 65.
Schmiedeisen, ausgeschmiedet .	7,6—7,8	6	—. 20 bis —. 40.
Wellenstahl	"	6	—. 40 " —. 50.
Inductorblech; maximale Dimension 1,2 × 1,2 m	"	15	—. 40 " —. 50.
Eisenband für Flachringe	"	5	—. 70.
2. **Bronce**	8,3—8,8	10	2. — bis 3. —.
3. **Zink,** in Platten . . .	7	—	—. 75.

Material	Spec. Gewicht	Zuschlag auf das bearbeit. Gewicht	Rohpreis pro kg in Franken
4. **Kupfer:**		%	
Als Draht oder Barren gezogen	8,8—9	2—3	1. 60 bis 1. 80.
Als Kabel	„	2—3	8—10 % mehr als Draht gleichen Gewichtes. Gewicht ca. 5 % grösser als dasjenige von massivem Draht gleichen Querschnittes.
Als Platten	„	—	2. 70.
Für Collectorlamellen	„	—	3. —.
Kosten der Umspinnung u. Umklöppelung	.	—	1 × umsponnen —. 20 bis —. 30. 2 × „ —. 30 „ —. 50. 3 × „ —. 60 „ —. 90. 1 × umklöppelt —. 50 „ —. 90
5. **Micca:**			
In Blocs von ca. 3 × 20 cm	2,8	10—20	16. — bis 25. — je nach Qualität.
Grosse Platten 10 × 40 cm	.	10—20	bis 50. — je nach Qualität.
Miccatuch, 0,4 — 0,6 mm Dicke	.	.	20. — bis 25. —.
6. **Ebonit:**			
Façonstücke	1,3	—	bis 15. — (hängt sehr von der Qualität ab und kann bis zu Fr. 20. — I. Qual. kosten.)
Platten	.	—	9. — bis 15. — (hängt sehr von der Qualität ab und kann bis zu Fr. 20. — I. Qual. kosten.)
Röhren, unpoliert	.	—	7. — (hängt sehr von der Qualität ab und kann bis zu Fr. 20. — I. Qual. kosten.)
7. **Asbest:**			
In Platten	2,1—2,8	—	
In Spulen	.	—	
Vulcabeston:			
In Platten	.	—	8. —.
In Ringen	.	—	8. — bis 10. —.
8. **Fiber,** in Platten	.	—	5. —.
9. **Papier:**			
Blechscheiben-Isolation	.	—	—. 40 bis —. 70.
Pressspahn	1,28	—	1. 20 „ 1. 50.
Spulen und geformte Stücke aus gepresstem Karton	.	—	7. — „ 12. —, Zuschlag für Modell 10. — bis 20. —.

Für Magazinierung, Verzinsung und Abgang mögen je nach Umständen 15—20 % Zuschlag auf den Materialpreis hinreichen.

Die gesamten Arbeitskosten lassen sich in gewissem Masse nach dem Gewichte schätzen und betragen, mittlere Löhne zu Grunde gelegt:

kg	250	500	1000	2000	4000	6000	10000
Cts. per kg	45	40	35	25	17	14	12

Eine Detaillierung hat keinen Zweck, weil die Kosten der verschiedenen Arbeiten bei ungefähr gleichem Gesamtpreis ziemlich stark schwanken. Interessieren können höchstens die Kosten der Wicklerei, welche ca. 20—30 % ausmachen.

Die allgemeinen Unkosten hangen vollständig von der Werkstätteneinrichtung und der Grösse des jährlichen Marktes ab; je besser die Werkstätten ausgestattet sind, desto grösser fallen auch die allgemeinen Unkosten aus. Umgekehrt jedoch sind die Arbeitskosten wieder entsprechend kleiner. Wo also in dem einen Falle ein Zuschlag von 100 % auf die Arbeitskosten genügt, haben moderne Fabriken mit 150—180 % zu rechnen.

X. Übersichtliche Zusammenstellung der zur Berechnung notwendigen Formeln.

Die Schwierigkeit beim Entwurfe einer neuen Maschine besteht nicht in der eigentlichen Rechnung, sondern in der Art und Weise, die vorhandenen Formeln in nutzbringender Weise anzuwenden. Besonders der Anfänger hat in erster Zeit etwas Mühe, aus der grossen Menge aller möglichen Formeln, von denen jede an und für sich wichtig ist, gerade diejenigen herauszufinden, welche ihn schnell zum Ziele führen.

Um daher den Überblick zu erleichtern, ist im Nachstehenden eine kurze schematische Zusammenstellung der wichtigsten bisher angeführten Gleichungen gegeben, in der Reihenfolge, wie dieselben ungefähr zur Anwendung gelangen dürften.

Es handle sich darum, eine ganz neue Maschine aufzuzeichnen.

Gegeben sei

die Leistung E und J,
die Tourenzahl v und
der ungefähre Nutzeffekt ζ.

Ferner sei man sich über die Art der Wicklung, Serie, Shunt u. s. w. bereits im Klaren.

Gesucht die übrigen Grössen.

Handelt es sich um einen Generator, so kann, insofern über die Polzahl nichts vorgeschrieben ist, ungefähr folgende Regel benutzt werden.

4polige Maschinen	beginnen	bei	ca.	*6—20*	*KW*	spec. Leistung
6 „	„	„	„	„ *100—150*	„	„ „
8 „	„	„	„	„ *200—300*	„	„ „

Den aus dem Nutzeffekt berechneten Verlust zerlege man in die einzelnen Glieder:

$$w_a, \; w_h, \; w_r, \; w_m \; \text{u. s. w.}$$

w_m darf nicht zu klein sein, weil die Maschine sonst sehr empfindlich für Strom- und Tourenänderungen wird.

Die Rechnung zerfällt in

A. Berechnung der Armatur;
B. „ „ Magnete.

Für die Wahl der Maschinenform siehe Tafel II.

Anmerkung. Die Zahlen in Klammern bedeuten stets die Seitenzahlen

A. ARMATUR.

D = Durchmesser in %m,
l = Länge in %m,
$\lambda = \frac{l}{D}$.

1. Erste approximative Vorausbestimmung der äussern Dimensionen.

42 u. **44**. $$D = 39 \sqrt{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{l}} = 11{,}5 \sqrt[3]{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$

für Ringe; (57)

43 u. **45**. $$D = 32 \sqrt{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{l}} = 10 \sqrt[3]{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$

für Trommeln.

Diese Formeln beziehen sich auf Generatoren und stimmen für Maschinen von ca. *15—400 KW* ziemlich gut, für kleinere ist

etwas mehr, für grössere etwas weniger zu nehmen. Bei Motoren setze man $EJ = 736\ PS$.

Vergleiche auch die Tabelle ausgeführter Armaturen (65).

Kontrolle (60). Umfangsgeschwindigkeit darf nicht über 25 bis 30 m/sec betragen. Aufzeichnen eines Teiles des Armaturumfanges (Fig. 41).

Drahtdimensionen:

48. Approximativer Drahtquerschnitt in mm² $s = \dfrac{J}{p_1 \,.\, 180\,\varepsilon}$.

ε = Ohm'scher Spannungsverlust ($= 0{,}02$—$0{,}06$).
Dicke der Isolation (54).

Mit Bezug auf Fig. 41 sei

N' = Anzahl Windungen pro Länge u_1,

so ist die totale Zahl Drähte

$$N = \frac{D\pi}{u_1} \,.\, N' \quad \text{und es muss}$$

49.
$$N < 6{,}37\, \frac{B_l\, \delta\, p_1 \,.\, p}{J \,.\, \beta} \quad \text{sein.} \qquad (33)$$

B_l = Kraftliniendichte in der Luft.
δ = Luftabstand in cm. β (siehe 34).

Zu diesem Zwecke müssen die Polschuhe ebenfalls aufgezeichnet werden.

B ergibt sich aus Gleichung 5.

$$B_l = \frac{E' \,.\, 60 \,.\, 10^8\, p_1}{n\, N \,.\, p} \,.\, \frac{1}{b \,.\, l}.$$

b = Polbogen in cm $= \dfrac{D\pi}{2p} \,.\, \beta$.
E' = EMK $= (1 \pm \varepsilon') E$.

ε' = Spannungsabfall = rund $2\,\varepsilon$, mit Berücksichtigung der Armaturreaktion.

2. Zweite Annäherungsrechnung.

49. $$D = \sqrt{\frac{E' p_1 \,.\, u_1 \, 12 \,.\, 10^8}{n \, N' \beta B \, l}}. \qquad (60)$$

Kontrolle. Bestimmung der genauen Wicklungslänge $\mathfrak{L}$.

21. Drahtquerschnitt $$s = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N J}{200 \,.\, \varepsilon E \,.\, p_1^2}. \qquad (59)$$

Nachsehen, ob die Wicklung Platz hat.
Wicklungsregeln (16—28).
Vergleiche über Trommel- und Ringwicklungen (29).

Da die maximale Zahl Commutator-Lamellen $N_2 = \frac{N}{2}$ bei Trommeln und gleich N bei Ringen ist, untersuche man auch, speciell bei hochgespannten Maschinen, ob die grösste zulässige Spannung zwischen zwei Segmenten (26):

$$e_2 = \frac{E \, 2 p}{N_2}$$

nicht grösser als 30—40 Volt wird, eventuell ist die Wicklung oder die Polzahl zu ändern.

Sättigung in den Zacken von Zackenarmaturen darf nicht über 16000—17000 im Maximum betragen.

3. Bestimmung des inneren Armaturdurchmessers D_1. (62)

5. $$\Phi = \frac{E' \,.\, 60 \,.\, 10^8 \, p_1}{n N \,.\, p}.$$

$$B_a = \frac{\Phi}{S_a}.$$

Annäherungsweise ist

$B_a = 14000—16000$ bei 2 poligen Maschinen, (62)
$12000—14000$ „ 4 „ „
$9000—12000$ „ 6 „ „

Anderseits zeigen ausgeführte Maschinen ungefähr folgende Verhältnisse von $\tau_1 = \frac{D_1}{D}$. (64)

Zahl der Pole	τ_1
2	0,3 —0,4
4	0,6 —0,65
6	0,65—0,70
8	0,70—0,80
10	0,78—0,83
12	0,80—0,85
24	0,9

Kontrollrechnung.

26. Wattverlust durch Hysteresis $w_h = \eta \,.\, B_a^{1,6} \,.\, \omega \,.\, V \,.\, 10^{-7}$. (42)

$$\omega = \frac{p\,n}{60},$$

V = Eisenvolumen in cm³.

Anmerkung. Bei einer genaueren Rechnung sollte auch der Hysteresisverlust in den Zacken nachgesehen werden, man muss in diesem Falle von w_h in der nachstehenden Rechnung diesen Betrag in Abzug bringen.

Ist $$\tau = \frac{D_1}{D'},$$

D_1 = innerer Durchmesser,

D' = Durchmesser des Fusskreises der Zacken, bei glatten Armaturen = D,

so findet man noch schneller mit Hülfe der Tab. VII (63)

50. $$\frac{(1-\tau)^{0,6}}{1+\tau} = \frac{2,5}{10^{10}} \cdot \frac{\Phi^{1,6}}{D'^{0,2}} \cdot \frac{1}{\lambda^{0,6}} \cdot \frac{\omega}{w_h} = m.$$

Für m gibt die Tab. VIII die Werte von τ an. Approximativ ist $\tau = 1 - m$.

4. Berechnung der Erwärmung. (49)

37. $$\text{Erwärmung in C}^0 = \frac{225 \times (w_a + w_h)}{\text{Oberfläche in cm}^2}.$$

Nach einer andern Formel ist

38. **Erwärmung der Armatur in C°** $= \dfrac{645\,(w_a + w_k)}{\text{Oberfl.}\,(1 + 0{,}3\,\sqrt{v})}$,

v = Umfangsgeschwindigkeit in m/sec.

5. Dimensionen des Commutators. (240)

Der Durchmesser soll so klein als möglich gehalten werden.

Für **Metallbürsten** ist

112. **Auflagfläche** in $^{m}/_{m}{}^{2}$ pro Amp. = ca. $5 + \dfrac{200}{\text{Amp. pro Stift}}$.

Bei Kohlenbürsten nehme man *12—15* $^{m}/_{m}{}^{2}$ pro Amp.

6. Bestimmung der Bürsten-Verschiebung. (184)

92. $$\frac{r}{L}t = 2\,\frac{D\beta \,.\, B_l \,.\, p_1 \,.\, \gamma \,.\, \varepsilon}{D_1 \,.\, J \,.\, U'\,(1 \pm \varepsilon')\,q}.$$

γ (siehe Fig. 110) Bogen umfasst von den Bürsten in $^{c}/_{m}$,
D_1 Durchmesser des Commutators in $^{c}/_{m}$,
U' = *2,3* bei Zackenarmaturen,
= *3* „ halbgeschlossenen Zacken,
= *3,5* „ Locharmaturen,
= *0,4* „ glatten Armaturen,

q = Anzahl Drähte pro Nut, bei glatten Armaturen = $\dfrac{N}{N_2}$.

Bei Generatoren ist $(1 + \varepsilon')$, bei Motoren $(1 - \varepsilon')$ einzusetzen.

Aus Tabelle XI wird der Wert von η entnommen und hieraus die Bürstenverschiebung a berechnet:

94. $$a = \sqrt{M^2 + \left(c + \frac{\delta}{\xi}\right)^2} - M.$$

(Für c, δ und ξ siehe Fig. 110.)

95. worin das Glied $M = \dfrac{\delta\,(1 \pm \varepsilon')}{\xi\,\beta\,\varepsilon\,\eta}$ ist. (192)

Für gute Maschinen ist $\frac{a}{c} < 0,6$, wird der Quotient $> 0,7$, so ist die Maschine unbrauchbar, oder mindestens sehr schlecht.

Bei Motoren ist noch eine Korrektion anzubringen, desgleichen bei Generatoren mit Kohlenbürsten (193 und 197).

Man berechne (199)

96. $$\frac{E_a}{E_1} = \frac{0{,}157 \, . \, J N}{\beta \delta_1 \, . \, \varepsilon p p_1 \, . \, B_l} \, . \, X = Y.$$

(Für δ_1 siehe Fig. 110.)

X ist in der Tabelle auf Seite 200 zu suchen.

η in Gleichung 95 ist dann durch

$$\eta' = \eta \, (1 \mp Y)$$

zu ersetzen. Das negative Zeichen gilt für Motoren, das positive für Generatoren.

Bei Maschinen mit Kohlenbürsten ist r noch um den Kontaktwiderstand der Bürsten zu vermehren (193).

7. Wellendurchmesser. (208)

d = Durchmesser an der schwächsten Stelle in ‰ (zwischen Commutator und Armatur),
n = Tourenzahl,
W = nützliche Leistung in KW.

Welle aus Schmiedeisen:

101. $$d = 20 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 23 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Welle aus Stahl:

102. $$d = 18 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 21 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Gibt für Maschinen über 100 PS etwas zu grosse, für kleine Maschinen bis ca. 15 PS zu kleine Wellendurchmesser.

Vergleiche die Tabelle ausgeführter Wellen (214).

Keiltabelle XII.

B. MAGNETE. (139)

Wir wollen annehmen, die Armatur sei nunmehr derart entworfen, dass sie in jeder Beziehung den aufgestellten Bedingungen entspreche; man habe sich auch durch eine kleine approximative Berechnung der Ampère-Windungen der Magnete überzeugt, dass die Maschine richtig proportioniert sei, — diese Kontrollrechnung sollte, beiläufig bemerkt, niemals unterlassen werden — es verbleibt folglich nur noch die definitive Feststellung der Magnetdimensionen und Bewicklung.

Man zeichne zunächst die Magnete ganz roh auf, unter Reservierung eines mutmasslichen Wicklungsraumes. Da ausgeführte Maschinen ca. 2—4 mal, im Mittel 2½ mal soviel Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis als auf der Armatur besitzen, mag für eine erste approximative Berechnung

$a w$ pro magnet. Stromkreis $= \frac{J N}{4 p p_1} \cdot 2{,}5$ angenommen werden.

Der approximative Wicklungsraum ist dann

114. **Wicklungsraum in** $^{m}/_{m}{}^{2} = c \, \frac{(\mathfrak{J} m)^2 \cdot \mathfrak{L}}{50 \, w}$.

$\mathfrak{L}$ = mittlere Wicklungslänge in $^{m}/$,
w = Wattverlust pro Spule,
$\mathfrak{J} m$ = Ampère-Windungen pro Spule.

Sind auf diese Weise die voraussichtlichen Kraftlinienlängen annäherungsweise bestimmt, so kann an eine genauere Rechnung der $a w$ geschnitten werden und zwar nach folgendem Schema mit Benutzung der Gleichung 71 (144).

Je nachdem Rechteck- oder konische Wicklung (261) angewandt wird, ist für c folgender Wert einzusetzen:

Drahtdicke $d = {}^{m}/_{m}$	0,5	1	2	3	4	5 u. mehr
Rechteckwicklung c =	0,1	0,007	0,04	0,035	0,033	0,032
Konische Wicklung c =	0,075	0,043	0,03	0,026	0,025	0,024

Bezeichnung	Querschnitt S in cm^2	Streuungskoefficient ν resp. K	Kraftliniendichte B pro cm^2	Kraftlinienlänge L in cm	aw pro cm Länge $f(B)$	aw Total
Polstücke	....	....	....	....	....	....
Bügel	....	....	....	....	....	....
Armatur	....	....	....	....	....	....
Luft	....	....	....	....	....	....
					Total .	....

ν siehe Tabelle X; K siehe Seite 128; $f(B)$ siehe Tafel I.

Zu dieser Tabelle ist zu bemerken:

1. Bei Seriemaschinen ist Φ aus der EMK, d. h. aus der Bürstenspannung + dem Spannungsabfall (bei Motoren —) auszurechnen; das Gleiche gilt für Nebenschlussmaschinen.
2. Bei Kompoundmaschinen sind zwei Rechnungen durchzuführen, der ersten legt man Φ, berechnet aus der Bürstenspannung (gibt die Nebenschlusswicklung), der zweiten Φ, berechnet aus der EMK, zu Grunde. Die Differenz aus den beiden gibt die aw der Kompoundwicklung.

Dem Einflusse der Armaturreaktion mag dadurch Rechnung getragen werden, dass man zu den so erhaltenen aw noch $1/4$ bis $1/3$ derjenigen der Armatur $\left(\frac{J N}{4 p p_1}\right)$ addiert. (Seite 202.)

54. **Drahtquerschnitt** $s = \frac{(\mathfrak{J} m)\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50}$. (74)

m_1 = Anzahl hintereinander geschalteter Spulen,
E = Spannung an den Enden der Magnetwicklung. Für Seriemaschinen und Kompoundwicklungen = totaler Spannungsverlust (εE), für Nebenschlussmaschinen = Bürstenspannung.

Anmerkung. Mit Rücksicht auf die Regulierung muss der Draht bei Nebenschlussmaschinen stets etwas dicker genommen werden (172 und 179).

Windungszahl pro Spule:

56. $$m = \frac{\mathfrak{J} m}{\varepsilon \,.\, J} = \frac{\mathfrak{J} m}{\mathfrak{J}}. \qquad (75)$$

Kontrolle. Nachzusehen, ob die Wicklung in dem vorausgesetzten Wicklungsraume Platz findet und eventuell die ganze Rechnung noch einmal auszuführen.

Erwärmung der Magnete.

37. $$\text{Erwärmung in C}^0 = \frac{335 \times \text{Wattverlust pro Spule}}{\text{Oberfläche einer Spule in } \%_m}. \quad (49)$$

Hat man nun die Maschine in der angegebenen Weise durchgerechnet, so ist es notwendig, die gefundenen Zahlen in übersichtlicher Weise zusammenzustellen und zwar so, dass auch eine zweite Person jederzeit im stande ist, die Rechnung zu kontrollieren. Es mögen zu diesem Zwecke einige praktisch bewährte Winke von Nutzen sein:

Ist die Maschine definitiv bestimmt, so werden die elektrischen und Konstruktionsdaten ungefähr wie das Musterformular am Schlusse zeigt, auf ein loses Blatt eingetragen, das später in einen nach Typen geordneten Shannon eingereiht wird. Die Rückseite ist für die Versuchsdaten reserviert. Selbstredend hat es keinen Zweck, die Versuchsdaten bei gleichen Maschinen zu wiederholen. Dagegen sollte dies nicht unterbleiben, sofern Änderungen in den Dimensionen, in der Wicklung oder im Guss vorgenommen werden. Auch die Gewichte können bei späteren Ausführungen des nämlichen Typus wegfallen. Von den Versuchen sind zu notieren:

1. Die Leerlaufs-Charakteristik, bezogen auf Erregung und Spannung.
2. Einige Belastungskurven, d. h. Spannungskurven bei konstanter Erregung und variabler Armatur-Stromstärke.
3. Widerstandsmessung der Armatur und Magnete.
4. Isolationsmessung der Wicklungen gegen das Gestell.
5. Temperaturzunahme der Maschine nach mehrstündiger Dauerleistung; wenn immer möglich aus der Widerstandszunahme der Wicklungen berechnet.
6. Beobachtungen über eventuelle Funkenbildung, Bürstenverschiebung u. s. w.

XI. Tabellen.

I. Tabelle der Widerstandskoefficienten (ϱ) bei 0° C. und Widerstandszunahme pro 1° C.

(Siehe Hilfsbuch für die Elektrotechnik von Grawinkel und Strecker.)

Material	ϱ	σ	Bemerkungen
Aluminium	0,03—0,05	0,0039	
Aluminiumbronce	0,12	0,001	
Antimon	0,5	0,0041	
Blei	0,22	0,0041	
Constantan (Basse & Selve, Altona)	0,5	0,00003	58 Cu, 41 Ni, 1 Mn
Eisen	0,1—0,12	0,0045	
Gaskohle	40—120	—	
Kruppin (Fr. Krupp, Essen)	0,85	0,0008	
Kupfer	0,161—0,18	0,0037—0,0039	Lazare, Weiller & Co., Paris
Magnesium	0,04	0,0039	
Messing	0,07—0,08	0,0015	
Neusilber	0,15—0,36	0,0003—0,0004	
Nickel	0,15	0,0037	
Nickelin (Fleitmann, Witte & Co., Schwerta)	0,44	0,0002—0,00008	55 Cu, 25 Ni, 19,5 Zn
Phosphorbronce	0,10	—	
Platin	0,12—0,16	0,0024—0,0035	
Quecksilber	0,95	0,00091	
Silber	0,016—0,018	0,0034—0,004	
Stahl	0,10—0,25	0,0052	
Wismuth	1,2	0,0037	
Zink	0,06	0,0042	
Zinn	0,10	0,0042	
Kohle	100—1000	—0,0003 bis —0,0008	

(7) $R = \frac{\mathfrak{L}}{s} \cdot \varrho$; (8) $\varrho^t = \varrho^0 \, (1 + \sigma t)$.

II. Draht-Tabelle.

Durchmesser in *m/m*	Querschnitt in *m/m²*	Gewicht von 1 *km* in *kg*	Widerstände von 100 *m* in Ohm	Durchmesser in *m/m*	Querschnitt in *m/m²*	Gewicht von 1 *km* in *kg*	Widerstände von 100 *m* in Ohm
0,1	0,008	0,069	212,892	3,60	10,18	90,2	0,16450
0,2	0,031	0,279	53,298	3,70	10,75	95,6	0,15604
0,3	0,071	0,629	23,688	3,80	11,34	100,8	0,14758
0,4	0,126	1,118	13,348	3,90	11,95	106,2	0,14006
0,5	0,196	1,745	7,545	4,00	12,57	111,8	0,13348
0,6	0,283	2,52	5,922	4,10	13,20	117,8	0,12690
0,7	0,385	3,41	4,352	4,20	13,85	123,4	0,12032
0,8	0,503	4,47	3,328	4,30	14,52	129,2	0,11468
0,9	0,636	5,67	2,632	4,40	15,20	135,6	0,10998
1,00	0,785	6,98	2,128	4,50	15,90	141,3	0,10528
1,05	0,860	7,69	1,922	4,60	16,62	148,1	0,10058
1,10	0,950	8,42	1,765	4,70	17,35	154,1	0,09682
1,15	1,041	9,20	1,607	4,80	18,10	161,0	0,09212
1,20	1,131	10,02	1,48	4,90	18,86	168,0	0,08836
1,25	1,229	10,88	1,36	5,0	19,64	174,5	0,07545
1,30	1,327	11,79	1,28	5,5	23,76	212	0,07050
1,35	1,431	12,70	1,166	6,0	28,27	252	0,05922
1,40	1,539	13,64	1,081	6,5	33,18	294	0,05038
1,45	1,631	14,63	1,017	7,0	38,14	341	0,04352
1,50	1,767	15,67	0,949	7,5	44,18	392	0,03788
1,55	1,887	16,80	0,864	8,0	50,27	447	0,03328
1,60	2,011	17,90	0,8272	8,5	56,74	505	0,02952
1,65	2,138	19,05	0,7802	9,0	63,62	567	0,02632
1,70	2,270	20,20	0,7332	9,5	70,88	629	0,02359
1,75	2,405	21,43	0,6956	10,0	78,55	698	0,02124
1,80	2,544	22,65	0,6580	10,4	85	756	0,0196
1,85	2,688	23,86	0,6204	10,7	90	801	0,0185
1,90	2,835	25,24	0,5922	11,0	95	845,5	0,0176
1,95	2,982	26,85	0,5612	11,3	100	890	0,0166
3,00	3,142	27,90	0,53298	11,8	110	979	0,0152
2,10	3,464	30,80	0,4794	12,35	120	1068	0,0139
2,20	3,976	33,80	0,4418	12,87	130	1137	0,0128
2,30	4,155	36,90	0,4042	13,35	140	1246	0,0119
2,40	4,524	40,30	0,3666	13,81	150	1335	0,0111
2,50	4,909	43,60	0,34028	14,27	160	1424	0,0104
2,60	5,309	47,30	0,3196	14,7	170	1513	0,0098
2,70	5,726	51,00	0,2914	15,15	180	1602	0,00927
2,80	6,158	54,80	0,2726	15,5	190	1691	0,0088
2,90	6,605	58,9	0,2538	15,95	200	1780	0,00835
3,00	7,069	62,9	0,23688	16,7	220	1958	0,00760
3,10	7,548	67,1	0,22090	17,5	240	2136	0,00695
3,20	8,043	71,6	0,20774	18,2	260	2314	0,00641
3,30	8,553	76,1	0,19552	18,9	280	2492	0,00596
3,40	9,08	80,8	0,18424	19,5	300	2670	0,00556
3,50	9,62	85,8	0,17390				

III. Kabel-Tabelle (Lazare, Weiller & Co.).

Zahl der Drähte	Durchmesser jedes Drahtes m/m	Durchmesser des Kabels m/m	Äquivalenter Draht		Gewicht in kg per km	Widerstand per km bei 15,56° C.
			Durchmesser m/m	Querschnitt m/m²		
3	0,508	1,07	0,86	0,585	6	29,07
3	0,609	1,29	1,06	0,893	8	20,10
3	0,711	1,50	1,24	1,216	11	14,83
7	0,508	1,54	1,35	1,423	13	12,43
7	0,609	1,83	1,62	2,075	19	8,63
7	0,711	2,13	1,90	2,849	25	6,337
7	0,762	2,28	2,03	3,242	29	5,525
7	0,838	2,51	2,23	3,923	35	4,561
7	0,914	2,74	2,43	4,65	42	3,835
7	1,02	3,04	2,71	5,77	52	3,108
7	1,22	3,66	3,25	8,30	74	2,158
7	1,42	4,27	3,78	11,28	100	1,585
7	1,63	4,88	4,34	14,73	132	1,213
7	1,83	5,49	4,87	18,66	166	0,959
7	2,03	6,10	5,41	22,98	205	0,778
19	0,914	4,57	4,03	12,74	113	1,404
19	1,02	5,08	4,47	15,72	140	1,137
19	1,22	6,10	5,35	22,66	201	0,7897
19	1,42	7,10	6,27	30,91	274	0,6704
19	1,63	8,12	7,16	40,25	358	0,4445
19	1,83	9,14	8,05	50,96	453	0,3512
19	2,03	10,1	8,94	62,77	559	0,2845
19	2,34	11,6	10,7	83,20	740	0,2151
19	2,64	13,2	11,6	106,30	945	0,1683
37	1,63	11,3	10,0	78,6	699	0,2274
37	1,83	12,8	11,2	99,6	885	0,1797
37	2,03	14,2	12,5	122,9	1093	0,1456
37	2,34	16,3	14,3	162,6	1445	0,1101
37	2,64	18,4	16,2	207,7	1847	0,0861
61	2,34	21,0	18,5	268,7	2389	0,0666
61	2,64	23,7	20,9	343,4	3052	0,0521

IV. Tabelle der Hysteresis-Koefficienten η.

(Nach Chas. Prot. Steinmetz, s. S. 41.)

Material	η
Sehr weicher Eisendraht (Ewing)	0,002
Sehr dünnes Eisenblech	0,003
Dickes Eisenblech	0,0033
Zweite Sorte Eisenblech	0,0042—0,0045
Geglühter Gussstahl	0,008
Werkzeugstahl	0,0094
Gussstahl von minderer Susceptibilität	0,0120
Gusseisen	0,0162
Gehärtneter Gussstahl	0,0250

V. Tabelle der Hysteresis-Koefficienten η.

(Nach Versuchen von Hopkinson.)

Material	Zustand	η
Schmiedeisen	— geglüht	0,00202
Weicher Bessemerstahl	0,045 % C „	0,00262
„ Witworth-Stahl	0,09 „	0,00257
„ „	0,32 „	0,00598
„ „	0,80 „	0,00786
„ „	0,32 in Öl gehärtnet	0,00954
„ „	0,89 „ „ „	0,01844
Siliciumstahl	3,44 % Si geschmiedet	0,00937
„	„ geglüht	0,00784
„	„ in Öl gehärtnet	0,01282
Manganstahl	4,73 % Mn wie geschmiedet	0,05963
„	„ geglüht	0,04146
„	8,74 „	0,08184
„	4,73 in Öl gehärtnet	0,06706
Chromstahl	0,62 % Cr wie geschmiedet	0,01179
„	1,2 „ „	0,01851
„	0,62 geglüht	0,00897
Grauguss	3,47 % C 0,17 % Mn	0,01826
Weisser Guss	2,04 0,39	0,01616
Spiegeleisen	4,5 8,0	—

VI. Tabelle der 1,6 Potenzen von B.

(Siehe Seite 42.)

B	Werte von $\eta \cdot B^{1,6}$ für			B	Werte von $\eta \cdot B^{1,6}$ für		
	$\eta = 0,002$	$\eta = 0,003$	$\eta = 0,004$		$\eta = 0,002$	$\eta = 0,003$	$\eta = 0,004$
500	41,6	62,4	83,2	10500	5432	8148	10864
1000	126,2	189,3	252,4	11000	5850	8775	11700
1500	241,2	361,8	482,4	11500	6282	9423	12564
2000	382,6	573,9	765,2	12000	6726	10089	13452
2500	546,4	819,6	1092,8	12500	7178	10767	14356
3000	731,8	1097,7	1463,6	13000	7642	11463	15284
3500	936,8	1405,2	1873,6	13500	8120	12180	16240
4000	1160	1740	2320	14000	8606	12909	17212
4500	1400	2100	2800	14500	9160	13740	18320
5000	1657	2486	3314	15000	9614	14421	19228
5500	1932	2899	3864	15500	10124	15186	20248
6000	2222	3333	4444	16000	10658	15987	21316
6500	2522	3783	5044	16500	11196	16794	22392
7000	2840	4260	5680	17000	11740	17610	23480
7500	3166	4749	6332	17500	12296	18444	24592
8000	3516	5274	7032	18000	12868	19302	25736
8500	3872	5808	7744	18500	13444	20166	26888
9000	4244	6366	8488	19000	14034	21051	28068
9500	4626	6939	9252	19500	14624	21936	29248
10000	5022	7533	10044	20000	15226	22839	30452

$$\text{(26)} \qquad \text{Hysteresisverlust} = \eta \cdot B^{1,6} \cdot \omega \cdot V \cdot 10^{-7}.$$

VII. Tabelle der Werte von $\lambda^{0,6}$.

(Siehe Seite 63.)

λ	$\lambda^{0,6}$	λ	$\lambda^{0,6}$
0,1	0,251	0,6	0,736
0,2	0,381	0,7	0,807
0,3	0,486	0,8	0,875
0,4	0,577	0,9	0,938
0,5	0,659	1,0	1,000

VIII. Tabelle der Werte aus Gleichung $\frac{(1-\tau)^{0,6}}{(1+\tau)} = M$.

M	τ	M	τ
0	1	0,439	0,50
0,085	0,95	0,481	0,45
0,132	0,90	0,525	0,40
0,173	0,85	0,571	0,35
0,212	0,80	0,620	0,30
0,248	0,75	0,673	0,25
0,286	0,70	0,730	0,20
0,323	0,65	0,789	0,15
0,360	0,60	0,853	0,10
0,400	0,55	0,922	0,05

Approximativ ist $\tau = 1 - M$.

IX. Tabelle der Werte von $\frac{1}{b} \Sigma \frac{1}{a}$.

(Zur Berechnung des Streuungskoefficienten K, siehe Seite 130.)

α	β	Werte von b in %m					
		10	20	30	40	50	60
$\alpha = 180^0$	$\beta = 0,8$	0,14	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
	$\beta = 0,7$	0,18	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05
	$\beta = 0,6$	0,20	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05
$\alpha = 150^0$	$\beta = 0,8$	0,17	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05
	$\beta = 0,7$	0,21	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06
	$\beta = 0,6$	0,24	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06
$\alpha = 120^0$	$\beta = 0,8$	0,21	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06
	$\beta = 0,7$	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07
	$\beta = 0,6$	0,30	0,19	0,14	0,10	0,09	0,08
$\alpha = 90^0$	$\beta = 0,8$	0,38	0,19	0,14	0,11	0,10	0,08
	$\beta = 0,7$	0,35	0,22	0,16	0,13	0,11	0,09
	$\beta = 0,6$	0,39	0,25	0,18	0,15	0,12	0,10

X. Tabelle des Streuungskoefficienten ν.

(Wiener, Electrical Engineer.) (Seite 144.)

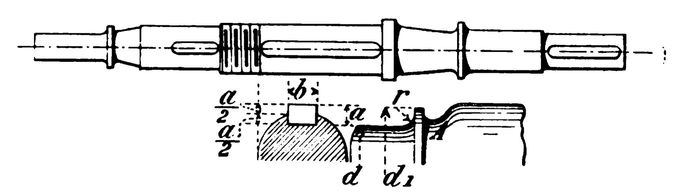
Kilo-Watt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Kilo-Watt
0,1	2,0	1,75	—	1,9	—	1,50	1,50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1
0,25	1,8	1,60	—	1,75	2,00	1,40	1,40	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25
0,5	1,7	1,50	2,00	1,65	1,90	1,35	1,35	1,80	1,90	—	—	—	—	—	—	0,5
1	1,65	1,45	1,90	1,60	1,80	1,30	1,30	1,70	1,75	—	—	—	—	—	—	1
2,5	1,6	1,40	1,80	1,55	1,70	1,28	1,28	1,60	1,65	1,75	1,60	1,50	1,40	1,90	2,00	2,5
5	1,55	1,35	1,75	1,50	1,65	1,25	1,28	1,55	1,60	1,65	1,50	1,40	1,35	1,80	1,90	5
7,5	1,50	1,30	1,70	1,45	1,60	1,22	1,22	1,50	1,55	1,60	1,45	1,35	1,32	1,70	1,80	7,5
10	1,45	1,28	1,65	1,40	1,55	1,20	1,20	1,45	1,50	1,55	1,40	1,32	1,30	1,65	1,70	10
25	1,40	1,25	1,60	1,35	1,50	1,18	1,18	1,40	1,45	1,50	1,35	1,30	1,28	1,60	1,65	25
50	1,35	1,22	1,55	1,32	1,45	1,15	1,15	1,35	1,40	1,45	1,30	1,28	1,25	1,55	1,60	50
100	1,30	1,20	1,50	1,30	1,40	1,12	1,12	1,30	1,35	1,40	1,25	1,25	1,22	1,50	1,55	100
200	1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	1,38	1,22	1,22	1,20	1,45	1,50	200
300	1,20	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,20	1,20	1,18	1,40	1,45	300
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,18	1,15	1,35	1,40	500
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,16	1,12	1,30	1,35	1000
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,15	1,10	1,25	1,30	2000

XI. Tabelle der Werte $e^{\frac{r}{L}t}$ und $Log \frac{\eta+1}{\eta-1}$

(Berechnung der Bürstenverschiebung siehe Seite 188.)

η	$e^{\frac{r}{L}t} = \frac{\eta+1}{\eta-1}$	$\frac{r}{L}t = Log \frac{\eta+1}{\eta-1}$	η	$e^{\frac{r}{L}t} = \frac{\eta+1}{\eta-1}$	$\frac{r}{L}t = Log \frac{\eta+1}{\eta-1}$	η	$e^{\frac{r}{L}t} = \frac{\eta+1}{\eta-1}$	$\frac{r}{L}t = Log \frac{\eta+1}{\eta-1}$
1,00	∞	∞	2,0	3,00	1,10			
1,01	201	7,6	2,2	2,66	0,98	7	1,33	0,288
1,02	101	4,6	2,4	2,43	0,88	8	1,28	0,250
1,05	41	3,7	2,6	2,25	0,81	9	1,25	0,220
1,1	21	3,04	2,8	2,11	0,75	10	1,22	0,198
1,2	11	2,4	3,0	2,00	0,69	12,5	1,17	0,160
1,3	7,66	2,03	3,5	1,80	0,59	15	1,14	0,131
1,4	6	1,78	4,0	1,67	0,52	17,5	1,12	0,113
1,5	5	1,06	4,5	1,57	0,45	20	1,10	0,110
1,6	4,33	1,46	5,0	1,50	0,405	25	1,08	0,080
1,8	3,5	1,25	6,0	1,40	0,336	30	1,07	0,066

XII. Keiltabelle.



(Modifikations-Tabelle von Jul. Römmele, Freiburg i. B.)

Für gusseiserne und Bronce-Naben anwendbar; in letzterem Falle sind Doppelkeile vorzusehen.

Welledurchmesser	Einfache Verkeilung		Doppelkeile	
d in m/m	a	b	a	b
16–20	5	7	4	6
21–25	5	8	4	6
26–30	6	10	5	7
31–35	7	11	5	8
36–40	7	12	6	10
41–45	8	13	6	10
46–50	9	15	7	11
51–55	10	16	7	12
56–60	10	17	8	13
61–65	11	18	8	13
66–70	12	20	9	15
71–75	13	21	9	15
76–80	13	22	10	17
81–85	14	24	10	17
86–90	14	25	11	18
91–95	15	26	12	20
96–100	16	28	13	21
101–110	17	30	13	22
111–120	18	32	14	24
121–130	19	34	14	25
131–140	20	36	15	26
141–150	21	38	16	28
151–160	22	40	17	30
161–170	23	42	18	32
171–180	24	44	19	34
181–190	25	46	20	36
191–200	26	48	21	38
201–220	28	52	22	40
221–240	30	56	23	42
241–260	32	60	24	44
261–280	34	64	25	46
281–300	36	68	26	48

XIII. Berechnung der Riemenscheibenbreite.

(Siehe Seite 222.)

$$\mathfrak{b} = c \cdot \frac{PS}{v}$$

PS = Pferdestärken

v = Riemengeschwindigkeit in m/sec per Sekunde.

$\frac{PS}{v}$	0,15	0,25	0,5	0,75	1	1,5	3	6	10	16,7 [1]	29 [1]	35 [2]
c	48	39	24	20	17	15	10	7	6,5	6	4,9	3,7

[1]) Tramway-Generatoren der Westinghouse Co.

[2]) Dampfmaschine J. Farcot.

Alphabetisches Sachregister.

A

Abkühlungsfläche 51.
Ableitungen 262.
Accumulatoren 76, 86.
Adt, Gebr. 262.
Alioth, Lager 218.
Seilscheiben 224.
Armatur 232, 242.
Bürstenhalter 258.
Maschinen 273.
Allmänna Svenska Elektr. Bolaget, Maschinen 214, 278.
American Line 205.
American Machinist 211.
Ampère'sche Polregel 2.
„ Stromeinheit 12.
Ampère-Windungen 3.
Anlassstrom 106.
Arbeitsvermögen von Material 209.
Armatur-Durchmesser, innerer 62.
„ -Gewicht 293.
„ -Körper 225.
„ -Reaktion 31, 70, 119, 198.
„ , Tabelle ausgef. Masch. 65.
„ -Umrechnung 51.
„ -Vorausbestimmung 57
Arnold, E., Prof. 15, 230, 232.
Atlantic Ave R. R. Co 223.
Ausbohrung 128.
Ausgleichdraht v. Kompoundmasch. 86.
Autenheimer, F., Prof., Wellenberechnung 208.

B

Baltimore & Ohio R. R., Parallelschalten 81.
Bandagen 247.
Basel, Tramwaygenerator 214, 275.
Beck, J. H., Seile 224.
Bell, Louis 106.
Berghausen, Polsucher 112.
Bernstein, A., Serieschaltung 69.
Biberist, Kraftübertragung 283.
Blechscheibenisolation 226.
Bosanquet, Magnetismus 133.
Bremsung, elektrische 115.
Brown, Boveri & Cie.,
Armatur 232, 235.
Bürstenhalter 253.
Maschinen 269.
Bruchbelastung von Drähten 249.
Bürstenauflagfläche 240.
Bürstenhalter, Konstruktion 251, 259.
Bürstenverschiebung 31, 184.

C

(siehe auch **K**)

Calculation 298.
Carter, Tremlett, Seile 224.
Champs Elysées, Centrale 214, 223.
Charakteristik 66.
Chaux-de-Fonds, Kraftverteilung 287.
Chèvres, Kraftübertragung 289.
Cie. de Fives-Lille, Lager 219.
Cie. de l'Industrie Electrique, Maschinen 281.
Commutator, Collector 15, 240, 246.
Couffinhal, Maschine 147, 205, 281.
Crocker, Wheeler & Co., Lager 219.
Crosby, O. T. 106.
Cycles (Perioden) 40, 42.

D

Dahlander, Rob. 281.
Dimensionen von Maschinen 295.

Drahtbeanspruchung 53, 74.
Drahtisolation 54.
Drehrichtung von Motoren 10, 110.
Dreileitersystem von Serie-Mot. 90.
Driving-horns 30, 245.
Dubs, H., Parallelschaltg. v. M 87
Dyn, Krafteinheit 13.

E

Edison Co., Schenecdady 225
Eickemeyer 243.
Effekt, Einheit 12.
Electrical Engineer 144.
Electrician 135, 139, 203, 224
Elektricitätsmenge 159.
Elektromagnete 1.
Elektromotorische Kraft 4.
Elektrotechn. Zeitschrift 120, 165, 184, 196, 203.
Elphinstone, Lord 133.
Erg 12.
Erwärmung von Armatur und Magneten 49.
Ewing, J. A., Prof. Hysteresisverlust 41.

F

Faraday 6, 66.
Farcot, J., Lager 218.
Riemenscheiben 222.
Armaturen 236.
Maschinen 270, 275.
Fischer-Hinnen, J., Regulierung von Trammotoren 102.
Permeabilitätsprüfungsapparat 160.
Bürstenverschiebung 184.
Konstruktionen 218, 236, 242, 245, 269, 275.
Fives-Lille, Lager 219.
Fleming, J. A., Prof., Wirbelströme 45.
Forbes, Prof. 133, 152, 255.
Foucauldströme 42.
Funkenbildung 31, 184.

G

Ganz & Cie., Riemenscheiben 222.
General Electrique Co., Tramwayregulierung 103.
Lager 219.
Armatur 232, 242.
Wellen 214.
Generatoren 3, 197.
Genua, Kraftübertragung 286.
Gewichte von Maschinen 46, 291.
Giles, G. 193.
Gramme-Wicklung 16.
Graphische Berechnung von Trammotoren 94.
Graphische Lösung praktischer Fragen 165.
Guilbert, F. 193.

H

Hamburg, Ausstellung 81.
Hefner-Alteneck'sche Trommel-Wicklung*), siehe Trommel-Wicklung 21.
Henry, Selbstinduktionskoefficient 187.
Hintereinanderschalten von Seriemaschinen 89.
Hopkinson, Dr., Magnetismus 139.
Eisenprüfungsapparat 158.
Hülfscollectoren 247.
Hütte, Taschenbuch des Ing. 249.
Hysteresis 40.

I

Induktion 3.
Intensität der Kraftlinien 2.

---

*) Ich hole hier eine Unterlassungssünde nach, welche leider nicht mehr ganz gut zu machen ist. Man spricht im allgemeinen von Trommeln im Gegensatze zu Grammeringen, während eigentlich die ersteren billigerweise ebenfalls nach ihrem Erfinder mit „Hefner-Alteneck'sche Trommeln“ bezeichnet werden müssten.

Isolation von Drähten 54.
„ „ Commutatoren 238, 240.
„ „ Armaturen 245.
„ „ Bürstenhaltern 252.
„ „ Magnetspulen 261.

J

Joule'sches Gesetz 5.
Journal of the Soc. of Electr Eng. 152.

K

Kapp, G., Armatur 214, 228.
Magnetismus 133.
Kabelquerschnitt 54.
Kabelschuhe 263.
Klemmen 263.
Knäuelwicklung 197, 241.
Kohlenbürsten 240.
Kompoundmaschinen 82, 107, 172.
Kondensator 159.
Kontaktwiderstand 193.
Korda, D. 214.
Kraftlinien, Entstehung 1.
Kraftübertragung mittelst Seriemaschinen 69, 88.
Kraftübertragung mittelst Nebenschlussmaschinen 107.
Kreuzverbindungen 18, 238.
Kupfergewicht 38.

L

Lagerkonstruktionen 215, 292
Lagerreibung 46, 215.
Lahmeyer 214, 230.
Lampenbatterie 80.
Lazare, Weiller & Cie. 249, 314.
Leistung, spec. 46, 52, 291.
Leitungsfähigkeit, magn. 2, 129.
Locharmaturen 29, 148, 190.
Luftabstand, Armaturen 56.
Lumière Electrique 203.
Lundell, Bürstenhalter 255

M

Masseinheiten 12.
Mordey, Wicklung 18.
Magnetgestell 259, 295.
Magn. Entlastungsapparat 220
„ Zug 161, 212.
„ Feld 3.
Magnetisierungskurven 66.
Magnetismus, remanent. 112.
Magnetomotorische Kraft 2, 134.
Magnetspulen 260.
Magnetwicklung 118, 131, 133.
Mantelwicklungen 29, 232, 242.
Materialpreise 299.
Maxwell, Zugkraft 161.
Mont Salève Bahn 287

N

Nebenschlussmaschine 73.
„ , als Motor 107
„ , Parallelschalten 79.
„ , Regulierung 77, 172.
Nutzeffekt 48.

O

Oerlikon, Maschinenfabrik,
Regulierung von Trammotoren 102.
Elektr. Bremsung 116.
Wellendicken 212, 214.
Lager 219.
Entlastungsapparat 220.
Seilscheiben 224.
Armaturen 228, 231, 238, 242.
Isolationsprüfung 246.
Bürstenhalter 257.
Maschinen 266, 272, 289.
Ohm, Widerstandseinheit 12.
Ohm'sches Gesetz 5.
Ohm'scher Verlust 37.

P

Paccinotti, (Gramme) Wicklung 16.
Parallelschalten von Kompoundmaschinen 86.
" " Nebenschlussmaschinen 79.
" " Seriemasch. 88.
Parallelwicklung 17.
Parshall, H. F., Armatur 232, 238.
Periodenzahl 40, 42.
Permeabilität 2, 129, 158.
Pferdestärke 12.
Philos. Mag. 134.
Picou, graph. Berechnung 170.
Plumb, Isolationen 245.
Pole, Begriff der 1, 2.
" Aufsuchen der 112
Polzahl 292.
Praktische Einheiten 12.
Preise von Materialien 299.

Q

Querinduktion, -Magnetisierung 201, 275, 281.

R

Regulierung von Nebenschlussmaschinen 108.
" " Tramwaymotoren 98.
Reibungskoefficient 216.
Reifer, J. J., Prof., Zapfenberechnung 221.
Reuleaux, F., Prof. 221.
Riemenscheibe 221, 294.
Riemenspannvorrichtung 264.
Riemenzug 47.
Ringwicklung 16.
Römele, J., Keiltabelle 215, 320.
Rowland 133.
Ryan, Prof. 203.

S

Sankey & Sons 4.
Sättigung der Magnete 81, 140, 291.
Sayers, Maschine 157.
Wicklung 35, 205, 281.
Schaltung von Widerständen 14.
Schleifenwicklung 21.
Schuckert 222, 237.
Seiffert, M., Seilscheiben 224.
Seilscheiben 221.
Selbstinduktionskoefficient 34, 186.
Serienmaschine 68.
Serienwicklung 17.
Serienparallelschaltung von Tram-Motoren 102.
Shuntmaschine 70.
Sibley Journ. of Eng. 203, 245.
Siemens & Halske 237.
Spannung 4, 9.
Spannungsabfall von Nebenschlussmaschinen 170, 201.
Sprague Regulierung 99.
Steinmetz, Ph. P., Hysteresisverlust 41.
Steirermühl Kraftübertragung 90.
Streuung 129, 136, 142, 150.
Stromrichtung 6.
Stromstärke 5, 12.
Stromverzweigungen 37.
Stahlgussmagnete 259.
Swinburne, Armaturreaktion 204.

T

Tabellen 312.
Tangentenfunktion von Kapp 137.
Teknisk-Tidskrift 203, 281.
Thompson, Silv. 40, 50, 206.
Thomson-Houston 103, 109, 214, 222.
Thury 237, 257, 283, 287.
Timmermann, A. H. & C. E., Erwärmung 50.
Tourenzahl, Änderung bei Motoren 132.

Traktionskoefficient 94.
Tramway-Generatoren 109.
„ -Motoren 92.
Trommelwicklungen 21.

U

Überkompoundieren 82.
Umklöppelung, Dicke der 54.
Umspinnung, „ „ 54.

V

Verein ehem. Schüler des Technikums in Winterthur 208.
Versuche von Maschinen 119.
Volt, Spannungseinheit 12.

W

Watt 12.
Wattverlust, Armatur 37.
Wellenberechnung 211, 214.
Wellenwicklung 21.
Westinghouse Co. Armaturgeschwindigkeit 51.
Regulierung von Tramwaymotoren 103, 117.
Riemenscheiben 222.
Armaturen 231, 245.
Bürstenhalter 256.
Wicklungsarten 15.
Wicklungskosten 301.
Wicklungsausführung 241.
Wicklungsraum 260.
Wicklungsschritt 21
Widerstand, Einheit 12.
Widerstandskoefficient 13.
Widerstandszunahme bei Erwärmung 14, 37.
Wiener, Streuungskoefficienten 144, 318.
Wood, Armatur 228.
Bürstenhalter 256.

Z

Zackenarmatur 29, 148, 189.
Zone, neutrale 15, 201.
Zugkraft. magnetische 161, 212.
„ mechanische 10, 13.
Zürich-Hirslanden, Tramway 106

Druckfehlerberichtigung.

Seite 9, Zeile 13, lies *halben,* statt selben;
„ 210, „ 32, „ *maximale,* statt maxiale;
„ 219, „ 1, „ *127—128,* statt 128 – 129;
„ 242, Schluss, „ *191* und *192,* statt 194 und 195;
„ 309, Zeile 23, „ *geschritten,* statt geschnitten

Die Tabelle Seite 261 und 309 ist wie folgt abzuändern:

Tabelle der Werte von c.

Durchmesser $d =$	0,5	1	2	3	4	5 u. mehr
Rechteckige Wicklung $c =$	*5*	*2,9*	*2,15*	*1,86*	*1,68*	*1,57*
Konische Wicklung $c =$	*3,75*	*2,2*	*1,6*	*1,4*	*1,26*	*1,18*

Urteile der Presse
über die 2. Auflage des vorliegenden Buches.

Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin) 1892, Heft 47:

Von den angehenden Dynamokonstrukteuren wurde bislang ein aus der Praxis hervorgegangenes Werk über die Konstruktion elektrischer Gleichstrommaschinen lebhaft vermisst. Diesem Mangel ist durch das vorliegende Buch in vortefflicher Weise abgeholfen. . . . . . . Aus der hier gegebenen Inhaltsübersicht dürfte schon zur Genüge hervorgehen, dass der Verfasser seine Aufgabe durchaus vom Standpunkte des praktischen Ingenieurs erfasst hat. Wir sind überzeugt, dass dieses Buch sich sehr zahlreiche Freunde erwerben wird. U.

Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1892, No. 51:

Das Buch ist aus der Praxis heraus für die Praxis entstanden und füllt von diesem Standpunkte aus eine wirkliche Lücke in unserer Dynamomaschinen-Litteratur aus. Der Verfasser will Studierenden, welche nach Beendigung ihrer Studien in die Praxis treten, und Maschineningenieuren, welche sich mit der Berechnung und Konstruktion von Dynamomaschinen beschäftigen wollen, aus dem Schatze seiner Erfahrungen Zahlen und Daten an die Hand geben, welche ihn befähigen, ohne vorherige Versuche eine Dynamomaschine für eine bestimmte Leistung im voraus zu berechnen. Und er hat diesen Zweck besser als irgend ein anderes uns bekanntes Werk erreicht. Aber auch der erfahrene Dynamokonstrukteur wird mit Nutzen das Buch in die Hand nehmen und von den Erfahrungszahlen Gebrauch machen, wenn auch für ihn manche der gebotenen Formeln überflüssig sind. Recht zweckmässig erscheint die Zusammenstellung der Hopkinson'schen Magnetisierungskurven — das Alpha und das Omega des konstruirenden Elektrotechnikers.

Schweizerische Bauzeitung (Zürich) 1893, No. 1:

Schon die erste Auflage der angeführten Publikation hat uns gute Dienste geleistet. Sie brachte dem Konstrukteur wertvolles, der Praxis entnommenes Material, das in der bestehenden Fachlitteratur entweder gar nicht zu finden war oder mühevoll aus dickleibigen Bänden oder periodischen Zeitschriften zusammengesucht werden musste . . . . Wertvoll wird das Buch durch die praktische Behandlung des Stoffes und durch die der Praxis entnommenen Erfahrungsresultate. Für letztere gebührt neben dem Verfasser auch der Direktion der Maschinenfabrik Oerlikon unser Dank. Die Ausstattung des Buches ist eine vorzügliche: Angenehmer grosser Druck und solides Papier. J. J. R.

Elektritschestwo, 1892, No. 21, Petersburg (Uebersetzung):

Der Verfasser des genannten Werkes, Herr Fischer-Hinnen, Ingenieur an der Maschinenfabrik Oerlikon (Schweiz) hat mit seiner Arbeit über die Berechnung der Dynamo-Maschinen einem sichtbaren Mangel in der elektrotechnischen Litteratur abgeholfen. . . . . . Das Buch von Herrn Fischer-Hinnen aber, das wir soeben behandeln, füllt alles aus, was die obgenannten Verfasser ausgelassen haben; es ist geschrieben, wie der Verfasser selbst sagt, «aus der Praxis» und «für die Praxis», d. h. er gibt nur das an, was er selbst in der Praxis für gut gefunden hat. Ein solcher Rechnungsgang, wie er im ganzen Buch durchgeführt ist, scheint uns sehr vernünftig. Wir können unsern Lesern daher dieses interessante Buch bestens empfehlen, es rechtfertigt vollständig den Satz des Verfassers: «aus der Praxis» für die Praxis. A. G.

Die Elektrizität (Leipzig), 1892, No. 18:

Bei der Abfassung dieses aus der Praxis hervorgegangenen und auch lediglich der Praxis gewidmeten Buches war es dem Autor hauptsächlich daran gelegen, dem angehenden Elektrotechniker eine gedrängte und doch möglichst komplette Sammlung aller derjenigen Formeln und Erklärungen an die Hand zu geben, welche für das richtige Verständnis und Berechnung elektrischer Gleichstrom-Maschinen unbedingt notwendig sind. . . . . Wir können das Werk allen denen, die sich mit der Konstruktion von Dynamos befassen, nur empfehlen. U.

Praktischer Maschinen-Constructeur (W. H. Uhland), 1893, No. 3:

Ein sehr wertvolles Buch, welches von einem in der Praxis stehenden Fachmanne zum Nutzen aller geschrieben ist, welche sich dem Studium der Gleichstrommaschinen widmen wollen und einen sicheren Führer für ihre Arbeiten sowie Berechnungen wünschen. Das Werk erscheint jetzt in der zweiten Auflage, welche gegen die erste ganz bedeutend

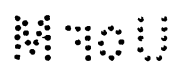
vermehrt und verbessert ist. Zahlreiche eingelegte Beispiele erleichtern das Verständnis der Formeln und des Ganges bei der Rechnung. Das Buch darf warm empfohlen werden.

L' Industria, rivista tecnica ed economica illustrata (Milano), 1893, 1⁰ Gennaio:

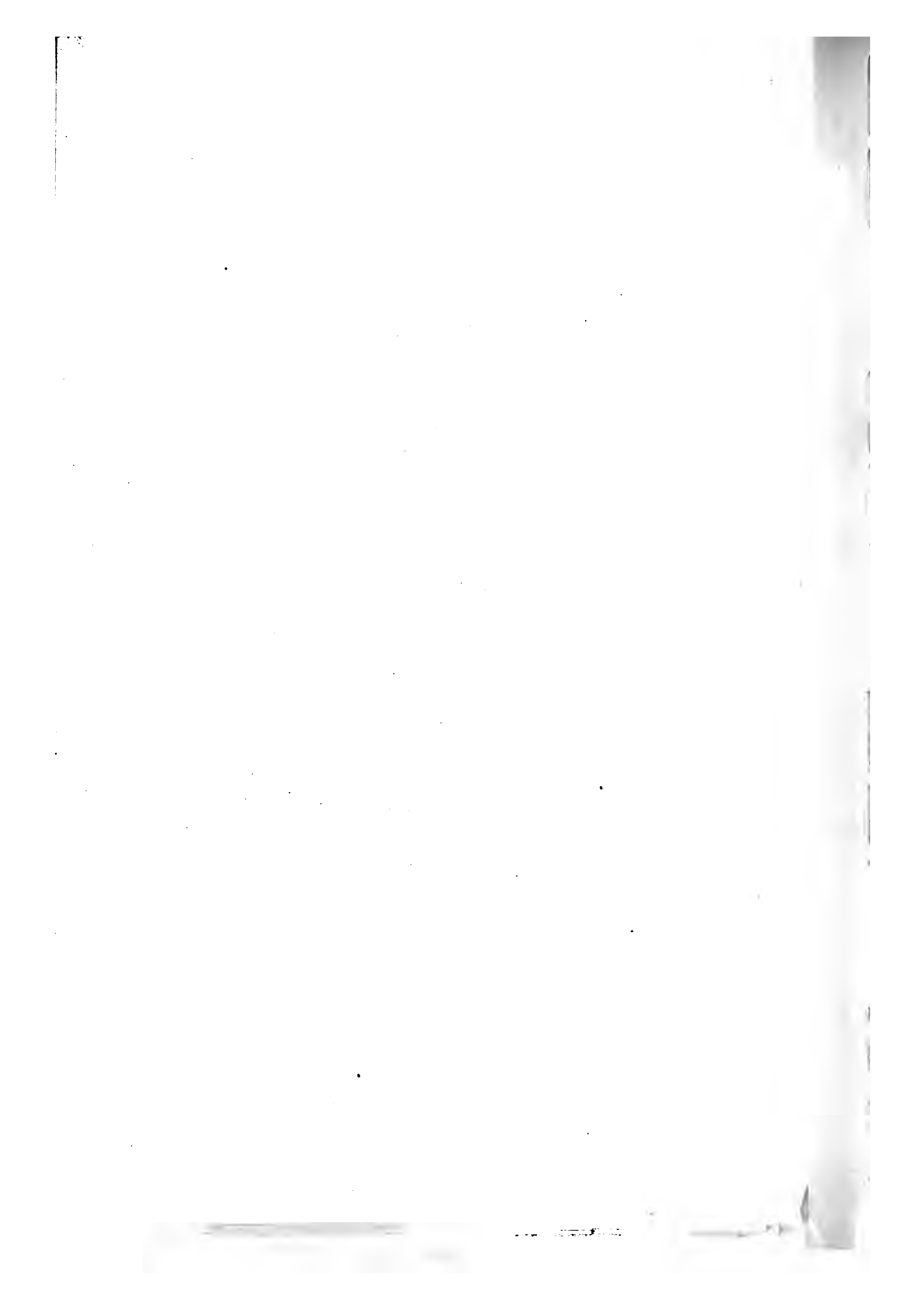
La posizione eminente, che la fabbrica, cui è addetto l' autore, tiene nella costruzione delle macchine dinamoelettriche e la circostanza che essa è stata una delle prime a mettersi sulla strada attualmente seguita bastano a dare una importanza a questo libro che, uscito dalla pratica, è destinato esclusivamente alla pratica. Esso si propone di fornire a chi si dedica allo studio della elettrotecnica una sommaria, ma completa racolta di quelle nozioni principali che sono indispensabili per ben apprezzare il funzionamento di una macchina dinamoelettrica a corrente continua e per calcolarla a dovere. I dati numerici e sperimentali, che l'autore ha raccolto nella sua carriera pratica, mettono il lettore in grado di determinare a priori, senza bisogno di tentativi, tutte le dimensioni di una dinamo, destinata a dare un effetto predeterminato. Questo scopo interamente pratico à raggiunto dal libro, che abbiamo dinanzi, in modo molto più completo che non in alcun altro dei trattati generali di elettrotecnica o speciali intorno alle dinamo precedentemente pubblicati. Il libro del signor Fischer-Hinnen è perciò destinato a prestare non pochi servizi non soltanto ai principianti, ma anche ai costruttori sperimentati. A questo proposito notiamo che molto opportunamente è annessa al libro una tavola rappresentante le curve di magnetizzazione di Hopkinson.

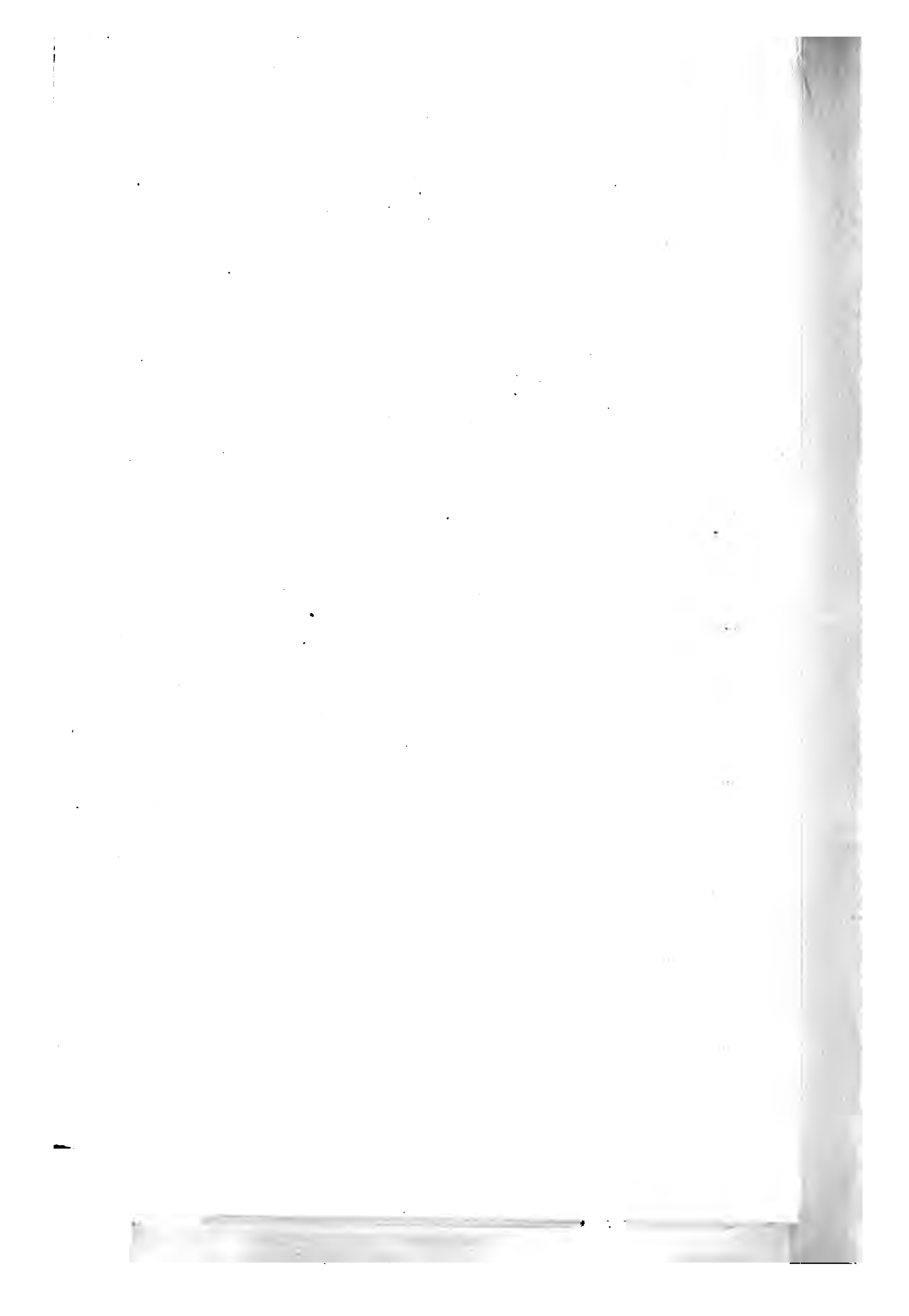
L'Electricien (Paris), 1893, No. 116:

La première édition de cet ouvrage a été promptement épuisée. Elle répondait à un besoin communément ressenti et généralement exprimé. Elle a rendu de grands services à tous ceux qui s'occupent de la technique des machines dynamos. Une deuxième édition nous arrive, revue et augmentée. L'auteur, lors de la conception du plan de son œuvre, s'est imposé la tâche de réunir en un ensemble clair et à la fois condensé toutes les formules et les explications qui sont absolument nécessaires à chaque électrotechnicien pour la compréhension et de calcul des machines à courant continu. L'auteur a l'avantage d'exercer des fonctions d'ingénieur dans un atelier de construction de machines. Il est, par conséquent, on ne peut mieux placé pour extraire des formules alambiquées tout ce qu'elles contiennent de pratique et tout ce qui est susceptible d'être substantié en réalisations concrètes. . . . . Le texte est judicieusement complété par de nombreuses gravures; les exemples de calcul choisis correspondent aux conditions les plus généralement observées dans la pratique, et les résultats obtenus empruntent une valeur toute spéciale aux enseignements que l'expérience de l'auteur a su récolter dans un atelier de construction, tel que celui d'Oerlikon. Les personnes qu'un intérêt quelconque rattache à l'industrie de la fabrication des dynamos trouveront, sans conteste, grand profit à consulter l'ouvrage de M. Fischer-Hinnen. EM. DIEUDONNÉ.



3






UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 06438 7098